

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karlo – Josip Andrić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Student:

Karlo – Josip Andrić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje i navedenu literaturu

Karlo – Josip Andrić

Zahvala

Zahvaljujem doc. dr. sc. Tei Žakuli na mentorstvu, svim znanjima, potpori i motivaciji tokom izrade ovog diplomskog rada te na brojnim konzultacijama i izdvojenom vremenu. Isto tako, zahvaljujem što je jedina koja je prihvatila moju nebrušenu ideju, krenula sa mnom u nepoznato, konstantno me navodila i usmjeravala da otkrijem kako je biti pravi inženjer te me uvela u novo područje energetskeg modeliranja i energetskih simulacija. Također, zahvale mag. ing. Ivanu Šimiću bez čije stručnosti određene analize ne bi bile ostvarive.

Zahvala studentskoj udruzi SUPEUS i njihovim članovima zbog čije sam pomoći i savjeta u samim počecima, ali i tokom rada dobio uvid u problematiku kompromisa građevinarstva, arhitekture i strojarstva. Posebna zahvala ide članovima: Kristini Vujnović, Petru Baričeviću, Dominiku Grubišiću, Matiji Đuksiju i Sonji Vukmirović.

Zahvaljujem studentskoj udruzi BEST koja je nakon 2 godine rada bila katalizator mog osobnog razvoja i pronalaska, nakon koje sam pronašao svoj životni poziv te prije svega naučio što ne želim raditi te kakva osoba ne želim biti u životu.

Zahvala ide Andriji Ljubičiću koji je imao veliku ulogu u trenucima kada mi je bilo teško te koji me usmjerio kada nisam znao kamo bi sa svojim budućim životom u struci. Začetak ideje diplomskog rada pripisujem njemu koji me uveo u ideju ekološkog gospodarstva, zelene gradnje, permakulture i održivog razvoja. Vratio me prirodi i njenim vrijednostima. Uz njegovog brata Tomislava Ljubičića i Dinu Hajdarevića, pokušat ćemo stvoriti bolju budućnost za sebe i svoje buduće obitelji.

Posebno hvala svim mojim domaćim i stranim prijateljima i kolegama sa faksa, bez čije pomoći i podrške ne bih uspio završiti fakultet. Posebno hvala: Luki Čalušiću, Jeleni Šklebar, Mireli i Marku Uzelac, Petru Filipoviću, Marinu i Dori Katana-Martić, Antoniu Matoševiću, Patriku Marcanu, Matku Sanjinu Jovanoviću, Josipu Žužulu, Josipu Gombocu, Patricku Parisu, Toniju i Igoru Labinjan, Manuelu Fuchsu i drugima.

Za kraj, najveće hvala mojoj djevojci Izabeli koja me čini boljim čovjekom te mojim roditeljima Đurđici i Edgardu koji su dali apsolutno sve da postanem i ostanem izgrađena osoba koja sam danas i koji mi pružaju neopisivu ljubav i podršku pri svakom mojem koraku i odluci.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Karlo Josip Andrić** Mat. br.: 0035185931

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija arhitektonskog rješenja niskoenergetske obiteljske kuće za različita klimatska podneblja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of an Architectural Design of a Low-energy Residential Building for Different Climates**

Opis zadatka:

Cilj rada je analiza i optimizacija niskoenergetske obiteljske kuće za različita klimatska podneblja korištenjem računalnih alata za energetska modeliranje zgrada. Za optimizaciju energetskih karakteristika zgrade potrebno je koristiti računalne programe za energetska modeliranje TRNSYS i Coolvent. U radu je potrebno optimizirati potrebnu godišnju energiju za grijanje i hlađenje analizom sljedećih parametara: a) orijentacija zgrade, b) sastav ovojnice, c) zasjenjenje i d) elementi pasivnog grijanja i hlađenja. Optimizaciju je potrebno provesti korištenjem meteoroloških podataka za Zagreb, Rijeku i Split. Kao podlogu za optimizaciju parametara koristiti izrađeni energetski model standardnog rješenja obiteljske kuće.

Rad treba sadržavati:

- opis početnog arhitektonskog rješenja,
- opis korištenih alata,
- opis metode i rezultata optimizacije: a) orijentacije zgrade, b) sastava ovojnice, c) zasjenjenja i d) elemenata pasivnog grijanja i hlađenja,
- usporedbu potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje između početnog i konačnog (optimiziranog) arhitektonskog rješenja,
- energetski model svih analiziranih rješenja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

3. svibnja 2018.

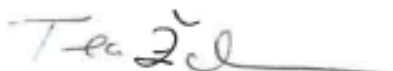
Datum predaje rada:

5. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:

11., 12. i 13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:


doc. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA I KRATICA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. Uvod.....	1
2. Optimizacija arhitektonskog rješenja kuće za Zagreb.....	3
2.1. Početno arhitektonsko rješenje (PAR).....	3
Rezultati energetske simulacije početnog arhitektonskog rješenja	7
2.2. Varijanta 1	9
Rezultati simulacije Varijante 1	9
2.3. Varijanta 2	11
Rezultati simulacije Varijante 2	16
2.4. Varijanta 3	17
Rezultati simulacije Varijante 3	19
2.5. Varijanta 4	21
Rezultati simulacije Varijante 4	21
2.6. Varijanta 5	23
Rezultati simulacije Varijante 5	23
3. Optimizacija arhitektonskog rješenja kuće za Split	29
3.1. Početno arhitektonsko rješenje (PAR).....	29
Rezultati energetske simulacije početnog arhitektonskog rješenja	29
3.2. Varijanta 1	30
Rezultati simulacije Varijante 1	30

3.3.	Varijanta 2	31
	Rezultati simulacije Varijante 2	36
3.4.	Varijanta 3	37
	Rezultati simulacije Varijante 3	38
3.5.	Varijanta 4	40
	Rezultati simulacije Varijante 4	40
3.6.	Varijanta 5	42
	Rezultati simulacije Varijante 5	42
4.	Optimizacija arhitektonskog rješenja kuće za Rijeku	46
4.1.	Početno arhitektonsko rješenje (PAR).....	46
	Rezultati energetske simulacije početnog arhitektonskog rješenja	46
4.2.	Varijanta 1	47
	Rezultati simulacije Varijante 1	47
4.3.	Varijanta 2	48
	Rezultati simulacije Varijante 2	53
4.4.	Varijanta 3	54
	Rezultati simulacije Varijante 3	54
4.5.	Varijanta 4	56
	Rezultati simulacije Varijante 4	57
4.6.	Varijanta 5	58
	Rezultati simulacije Varijante 5	58
5.	Zaključak	62
	POPIS LITERATURE	64

POPIS SLIKA

Slika 1: Početno arhitektonsko rješenje obiteljske kuće	3
Slika 2: Tlocrt arhitektonskog rješenja.....	4
Slika 3: Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje početnog arhitektonskog rješenja za Zagreb.....	8
Slika 4: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a i Varijante 1 za Zagreb.....	10
Slika 5: Usporedba potrošnje energije za grijanje i hlađenje svih iterativnih slučajeva za Zagreb	14
Slika 6: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1 i Varijante 2 za Zagreb	16
Slika 7: Ruža vjetrova za Grad Zagreb	18
Slika 8: Usporedba potrebne energije za grijanje i hlađenje između Varijante 2, iteracijskih međukoraka i Varijante 3 za Zagreb	20
Slika 9: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2 i Varijante 3 za Zagreb	20
Slika 10: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3 i Varijante 4 za Zagreb	22
Slika 11: Udio potrebne energije za hlađenje ostvaren korištenjem pasivnog hlađenja za Zagreb	24
Slika 12: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3, Varijante 4 i Varijante 5 za Zagreb	25
Slika 13: Konačno arhitektonsko rješenje obiteljske kuće za Zagreb	26
Slika 14: Konačno arhitektonsko rješenje za Zagreb – tlocrt.....	27
Slika 15: Konačno arhitektonsko rješenje za Zagreb – pogled prema dnevnom boravku te kuhinji i blagovaonici na jugu	27
Slika 16: Konačno arhitektonsko rješenje za Zagreb – pogled prema spavaćim sobama i zahodu na sjeveru.....	28
Slika 17: Konačno arhitektonsko rješenje za Zagreb – pogled prema ulaznim vratima, hodniku i istočnom prozoru kuhinje.....	28
Slika 18: Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje PAR-a za Split.....	29

Slika 19: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a i Varijante 1 za Split	31
Slika 20: Usporedba potrošnje energije za grijanje i hlađenje svih iterativnih slučajeva za Split	33
Slika 21: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1 i Varijante 2 za Split.....	36
Slika 22: Ruža vjetrova za Split	37
Slika 23: Usporedba potrebne energije za grijanje i hlađenje između Varijante 2, iteracijskih međukoraka i Varijante 3 za Split.....	39
Slika 24: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2 i Varijante 3 za Split.....	39
Slika 25: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3 i Varijante 4 za Split	41
Slika 26: Udio potrebne energije za hlađenje ostvaren korištenjem pasivnog hlađenja za Split	43
Slika 27: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3, Varijante 4 i Varijante 5 za Split	44
Slika 28: Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje PAR-a za Rijeku.....	46
Slika 29: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a i Varijante 1 za Rijeku	48
Slika 30: Usporedba potrošnje energije za grijanje i hlađenje svih iterativnih slučajeva za Rijeku	51
Slika 31: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1 i Varijante 2 za Rijeku.....	53
Slika 32: Usporedba potrebne energije za grijanje i hlađenje između Varijante 2, iteracijskih međukoraka i Varijante 3 za Rijeku.....	55
Slika 33: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2 i Varijante 3 za Rijeku.....	56
Slika 34: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3 i Varijante 4 za Rijeku	58
Slika 35: Udio potrebne energije za hlađenje ostvaren korištenjem pasivnog hlađenja za Rijeku	59
Slika 36: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3, Varijante 4 i Varijante 5 za Rijeku	60

POPIS TABLICA

Tablica 1: Osnovni podaci o prostorijama	4
Tablica 2: Ulazni parametri PAR-a	5
Tablica 3: Svojstva ovojnice PAR-a	6
Tablica 4: Svojstva ostakljenja PAR-a	7
Tablica 5: Svojstva novog ostakljenja	9
Tablica 6: Opis analiziranih scenarija promjene svojstava neostakljenih površina za Zagreb	13
Tablica 7: Usporedba cijena i procijenjeni jednostavni periodi povrata za izolacijske materijale za Zagreb	14
Tablica 8: Svojstva i debljine materijala svih ploha Varijante 2 za Zagreb	15
Tablica 9: Usporedba parametara između Varijante 2, iteracijskih međukoraka i Varijante 3 za Zagreb	19
Tablica 10: Usporedba parametara zasjenjenja između Varijante 3, iteracijskih međukoraka i Varijante 4 za Zagreb	22
Tablica 11: Usporedba potrebne energije za hlađenje bez i s pasivnim hlađenjem za Zagreb	24
Tablica 12: Usporedba cijena i procijenjeni jednostavni periodi povrata za izolacijske materijale za Split	33
Tablica 13: Opis analiziranih scenarija promjene svojstava neostakljenih površina za Split ..	34
Tablica 14: Svojstva i debljine materijala svih ploha Varijante 2 za Split	35
Tablica 15: Usporedba parametara između Varijante 2, iteracijskih međukoraka i Varijante 3 za Split	38
Tablica 16: Usporedba parametara zasjenjenja između Varijante 3, iteracijskih međukoraka i Varijante 4 za Split	41
Tablica 17: Usporedba potrebne energije za hlađenje bez i s pasivnim hlađenjem za Split	43
Tablica 18: Opis analiziranih scenarija promjene svojstava neostakljenih površina za Rijeku	50
Tablica 19: Usporedba cijena i procijenjeni jednostavni periodi povrata za izolacijske materijale za Rijeku	51
Tablica 20: Svojstva i debljine materijala svih ploha Varijante 2 za Rijeku	52
Tablica 21: Usporedba parametara između Varijante 2, iteracijskih međukoraka i Varijante 3 za Rijeku	55

Tablica 22: Usporedba parametara zasjenjenja između Varijante 3, iteracijskih međukoraka i Varijante 4 za Rijeku.....	57
Tablica 23: Usporedba potrebne energije za hlađenje bez i s pasivnim hlađenjem za Rijeku.	59

POPIS OZNAKA I KRATICA

ACH	$[h^{-1}]$	broj izmjena zraka uslijed infiltracije
T_H	$[^{\circ}C]$	postavna temperatura za grijanje
T_C	$[^{\circ}C]$	postavna temperatura za hlađenje
Q_{int}	$[kW]$	toplinski dobici od ljudi, rasvjete i opreme
$Q_{C,nd}$	$[kWh]$	potrebna energija za hlađenje
$Q_{H,nd}$	$[kWh]$	potrebna energija za grijanje
$Q''_{C,nd}$	$[kWh/m^2a]$	potrebna specifična energija za hlađenje
$Q''_{H,nd}$	$[kWh/m^2a]$	potrebna specifična energija za grijanje
U	$[W/m^2K]$	koeficijent prolaza topline
λ	$[W/mK]$	toplinska provodnost
SHGC	$[-]$	koeficijent toplinskih dobitaka od Sunca
JPP	$[god]$	jednostavni period povrata

SAŽETAK

U radu je prikazan proces analize i optimizacije potrebne energije za grijanje i hlađenje na primjeru obiteljske kuće za Zagreb, Split i Rijeku. Cilj rada je bio optimizacijom početnog arhitektonskog rješenja (PAR) dobiti završni model koji zadovoljava standard niskoenergetske kuće. Analiza je uključivala optimizaciju sastava ovojnice, svojstva i veličinu ostakljenja, sustava zasjenjenja, geometrije i orijentacije kuće te korištenje pasivnih strategija. Pri tome su korišteni računalni alati TRNSYS za modeliranje energetskih sustava i CoolVent za modeliranje pasivnog hlađenja uslijed prirodne ventilacije. Prema *Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* ukupna godišnja potrebna energija za grijanje u kategoriji niskoenergetskih obiteljskih kuća mora biti manja od 40,50 kWh/m² za kontinentalnu Hrvatsku te 24,84 kWh/m² za primorsku Hrvatsku, a za hlađenje manja od 50 kWh/m². Na temelju analiziranih varijanti odabrano je konačno rješenje kojim je postignuta potrebna specifična energija za grijanje od 28 kWh/m² za Zagreb, 9 kWh/m² za Split te 17 kWh/m² za Rijeku što je, u odnosu na PAR, za 72% manje za Zagreb, 73% za Split te 62% za Rijeku. Potrebna specifična energija za hlađenje smanjena je na 5 kWh/m² za Zagreb, 15 kWh/m² za Split te 15 kWh/m² za Rijeku što je, u odnosu na PAR 97% manje za Zagreb, 92% za Split te 91% za Rijeku. Konačno rješenje je rezultat kompromisa koji nastoji zadovoljiti kriterije gradnje prirodnim materijalima, ekološke očuvanosti, ekonomske isplativosti, funkcionalnosti, toplinske ugodnosti te energetske učinkovitosti.

Ključne riječi: Optimizacija, TRNSYS, Energetska učinkovitost

SUMMARY

The work presents a process of the analysis and optimization of the heating and cooling energy consumption on the example of a family house in Zagreb, Split and Rijeka. The aim of the work was to get the final model that satisfies the low-energy house standard by optimizing the initial architectural design model. The analysis included optimization of outer shell, glazing size and properties, shading system, house geometry and orientation and use of passive strategies. In this case, software TRNSYS for energy system modeling and CoolVent for modeling of the passive cooling due to natural ventilation were used. According to the *Technical regulation on the rational use of energy and thermal protection in buildings*, the total annual heating energy required in the category of low-energy family houses must be less than 40,50 kWh/m² for continental Croatia, 24,84 kWh/m² for coastal Croatia, and for cooling less than 50 kWh/m². Based on the analysis, the final solution achieves the required specific heating energy of 28 kWh/m² for Zagreb, 9 kWh/m² for Split and 17 kWh/m² for Rijeka, which is, compared to the initial architectural solution, 72% less for Zagreb, 73% for Split and 62% for Rijeka. The required specific cooling energy was reduced to 5 kWh/m² for Zagreb, 15 kWh/m² for Split and 15 kWh/m² for Rijeka, which is, compared to the initial architectural solution, for 97% less for Zagreb, 92% for Split and 91% for Rijeka. The final solution is the result of a compromise that seeks to meet the criterias of the use of natural materials, ecological preservation, economic viability, functionality, thermal comfort and energy efficiency.

Key words: Optimization, TRNSYS, Energy efficiency

1. Uvod

Europska Unija postavlja sve strože zahtjeve na energetske učinkovitost u zgradarstvu u cilju uštede energije i smanjenja stakleničkih plinova. Stoga se javlja potreba za poboljšanjem učinkovitosti te optimizacijom sustava postojećih i novih zgrada. Kako je svaka zgrada specifičan i složen sustav, često je teško napraviti procjenu performansi zgrade i detaljnu optimizaciju sustava bez korištenja računalnih alata za energetske modeliranje. Korištenje programskih alata koji su trenutno dostupni na tržištu ponekad su jedini način za optimalni razvoj sustava unutar zgrade. Također, ovakvim pristupom moguće je smanjiti vrijeme iterativnog postupka od idejnog rješenja do gotovog rješenja na terenu u odnosu na pristup "pokušaj-pogreška". Takav pristup štedi materijal, radnu snagu i novac. Korištenjem programskih alata omogućuje se kreiranje rješenja koje je spremno za direktnu proizvodnju, gradnju, ugradnju ili primjenu. Energetsko modeliranje korištenjem detaljnih računalnih alata omogućuje optimizaciju geometrije i svojstva ovojnice zgrade, pasivnih i mehaničkih sustava te načina upravljanja navedenih sustava u ovisnosti o namjeni i meteorološkim podacima na lokaciji zgrade te pogonskim i investicijskim troškovima. Rezultati simulacije pomažu u predviđanju toplinskih i rashladnih opterećenja, optimizaciji potrošnje energije za pogon uređaja, strojeva i rasvjete te predviđanju parametara toplinske ugodnosti korisnika zgrade. Imajući uvid u rješenja optimizacije, inženjerima je olakšano donošenje odluka o primjeni drugačijih koncepata ili promjeni pristupa na samoj lokaciji.

U ovom radu prikazan je proces analize i optimizacije potrošnje energije za grijanje i hlađenje kroz iterativni postupak na primjeru arhitektonskog rješenja obiteljske kuće za Zagreb, Split i Rijeku. Cilj rada bio je optimizacijom početnog modela arhitektonskog rješenja dobiti završni model koji zadovoljava standard niskoenergetske kuće. Pri tome su korišteni računalni alati TRNSYS za modeliranje energetskih sustava i CoolVent za modeliranje pasivnog hlađenja uslijed prirodne ventilacije. Prema *Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* ukupna godišnja potrebna energija za grijanje u kategoriji niskoenergetskih obiteljskih kuća mora biti manja od 40,50 kWh/m² za kontinentalnu Hrvatsku, 24,84 kWh/m² za primorsku Hrvatsku, a za hlađenje manja od 50 kWh/m². U procesu optimizacije, prilikom odabira građevnih materijala i rasporeda prostorija obiteljske kuće, savjetodavna pomoć dobivena je od strane studenata građevinskog, arhitektonskog i strojarškog fakulteta unutar studentske udruge "SUPEUS". Zadnje, ali ne manje važno, cilj rada bio je i

pokušaj modeliranja niskoenergetske kuće na način da se spoji gradnja lako dostupnim, prirodnim materijalima, čime se smanjuje ekološki utisak čovjeka na okoliš, ekonomska isplativost niskoenergetske kuće te mogućnost samostalne izgradnje iste.

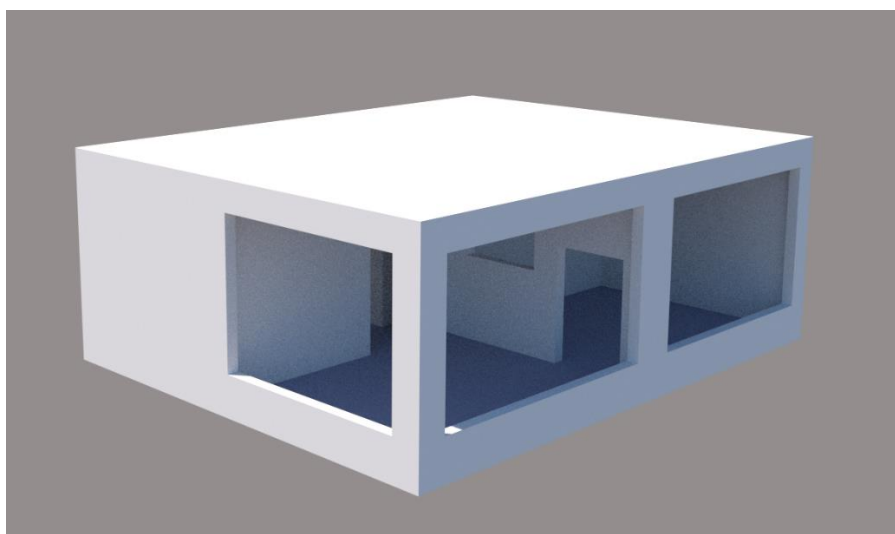
Diplomski rad podijeljen je u tri opsežne analize koje uključuju razvoj modela i analizu optimalnog rješenja niskoenergetske kuće za Zagreb, Split te Rijeku. U prvom dijelu rada opisano je početno arhitektonsko rješenje te sažetak rezultata modela koji je napravljen u Projektu PE (Poglavlje 2.1). Model sadrži geometriju početnog arhitektonskog rješenja, orijentacije i nagib ploha, odabrane materijale i debljinu pojedinih građevnih elemenata, definirane zone, raspored korištenja, broj ljudi, intenzitet unutarnjih dobitaka od opreme i rasvjete, vrijednosti za infiltraciju, postavne temperature te raspoložive kapacitete za grijanje i hlađenje. Na osnovu navedenih podataka provedena je simulacija godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje s vremenskim korakom od jednog sata te koristeći podatke o vanjskim vremenskim uvjetima za tipičnu meteorološku godinu u Zagrebu. Uz prethodno spomenute alate za energetsko modeliranje, u radu su korišteni i opći programski jezik MATLAB za obradu ulaznih i izlaznih podataka te program Excel za vizualizaciju rezultata optimizacije.

Za sva tri grada proveden je identičan postupak optimizacije za smanjenje potrošnje potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje kako bi se zadovoljio standard niskoenergetske kuće. U prvoj varijanti optimizacije promijenjena je vrsta ostakljenja u svrhu smanjenja potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje (Poglavlja 2.2, 3.2, 4.2). U drugoj varijanti promijenjen je sastav vanjske ovojnice te debljina pojedinih materijala u svrhu daljnjeg smanjenja potrebne godišnje energije za grijanje uz zadovoljenje najvećih dopuštenih vrijednosti koeficijenta prolaza topline navedenih u *Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* (Poglavlja 0, 3.3, 4.3). U trećoj varijanti izvršena je daljnja optimizacija geometrije kuće, veličine vanjskog ostakljenja te orijentacije kuće korištenjem kombinacije programskih alata TRNSYS i CoolVent (Poglavlja 2.4, 3.4, 4.4). U četvrtoj varijanti analizirana je primjena zasjenjenja vanjskih ostakljenja u cilju dodatnog smanjenja potrebne godišnje energije za hlađenje (Poglavlja 2.6, 3.5, 4.5). Konačno, cilj pete varijante bio je potpuno ukloniti potrebu za mehaničkim hlađenjem u prijelaznim mjesecima (travanj, svibanj, rujan, listopad) korištenjem pasivnog hlađenja te time smanjiti potrebnu godišnju energiju za hlađenje. Analiza pasivnog hlađenja provedena je korištenjem programskog alata CoolVent (Poglavlja 2.6, 3.6, 4.6).

2. Optimizacija arhitektonskog rješenja kuće za Zagreb

2.1. Početno arhitektonsko rješenje (PAR)

Obiteljska kuća ukupne površine 80 m^2 (korisne površine 69 m^2), dimenzija $8 \times 10 \times 3,5 \text{ m}$, napravljena u programskom alatu za 3D modeliranje SketchUp-u sastoji se od dnevnog boravka, kuhinje i blagovaone, dječje spavaće sobe, zahoda, hodnika i bračne spavaće sobe (Slika 1). Namijenjena je za četveročlanu obitelj. Raspored prostorija prikazuje Slika 2, dok Tablica 1 daje sve relevantne geometrijske podatke za modeliranje ovojnice zgrade, kao što su površine prostorija, njihove orijentacije, broj ostakljenja po prostorijama te ukupna površina ostakljenih površina. Podaci o vanjskim vremenskim uvjetima korišteni su za tipičnu meteorološku godinu za mjernu postaju Zagreb, Maksimir.



Slika 1: Početno arhitektonsko rješenje obiteljske kuće

U početnom arhitektonskom rješenju dnevni boravak te kuhinja i blagovaonica smješteni su na istočnoj strani jer prilikom izlaska Sunca dolazi do direktnog zračenja u jutarnjim satima kroz velike ostakljene površine što u konačnici uzrokuje relativno velike toplinske dobitke. Ta činjenica bitna je zimi, pri čemu u jutarnjim satima Sunčeva energija

prolazi kroz prozor, akumulira se u termalnoj masi poda te zagrijava zrak u prostoriji, što može dovesti do ušteda energije za grijanje. Obje spavaće sobe te zahod i hodnik smješteni su na zapadnoj strani te imaju manje ostakljenih površina. Razlog tome je manja potreba za Sunčevim dobicima kroz ostakljenja zbog kraćeg boravka ljudi unutar tih prostorija te manjih zahtjeva za održavanjem konstantne postavne temperature, s obzirom da se uglavnom koriste isključivo noću prilikom spavanja.



Slika 2: Tlocrt arhitektonskog rješenja

Tablica 1: Osnovni podaci o prostorijama

Namjena prostorije	Broj zone	Površina [m ²]	Orijentacija	Broj ostakljenih površina	Ukupna površina ostakljenja [m ²]
Dnevni boravak	1	20,5	JI	2	19,75
Kuhinja + Blagovaonica	2	18,0	SI	1	9,75
Dječja spavaća soba	3	9,9	SZ	1	3,60
Zahod	4	4,8	Z	1	1,44
Hodnik	5	5,9	Z	-	-
Bračna spavaća soba	6	9,9	JZ	1	3,75

Model PAR-a napravljen u računalnom programu TRNSYS sadrži geometriju početnog arhitektonskog rješenja (Tablica 1), orijentaciju i nagib ploha, svojstva i debljinu pojedinih građevnih elemenata (Tablica 3), definirane zone, raspored korištenja, broj ljudi, intenzitet unutarnjih dobitaka od opreme i rasvjete, vrijednosti za infiltraciju, postavne temperature te raspoložive kapacitete za grijanje i hlađenje (Tablica 2). Raspoloživi kapaciteti za grijanje i hlađenje definirani su kao beskonačni kako bi se za svaki sat u godini osigurala željena postavna temperatura. Prostorije obiteljske kuće koriste se od 0 do 24 sata, no intenzitet korištenja je podijeljen u dva vremenska perioda. Od 0 do 8 sati intenzitet korištenja kuće je manji pa sukladno tome minimalna postavna temperatura za grijanje iznosi 15°C, a za hlađenje 40°C. Od 8 do 24 intenzitet korištenja je veći stoga su postavne temperatura za grijanje veće, a za hlađenje manje (Tablica 2). Infiltracija u svim prostorijama iznosi 0,5, dok unutarnje dobitke od ljudi, rasvjete i opreme prikazuje Tablica 2. Unutar obiteljske kuće boravi 4 osobe, dok dobitak od jedne osobe iznosi 75 W. Instalirani kapacitet rasvjete iznosi 1000 W, a opreme 1430 W. Unutarnji toplinski dobici u Tablica 2 dobiveni su na način da se za svaku zonu definirao raspored, odnosno intenzitet boravka ljudi, rasvjete i opreme za jedan dan. Ukupni dnevni unutarnji dobici iznose 828 W, odnosno 12 W/m².

Tablica 2: Ulazni parametri PAR-a

Namjena prostorije	Zona	ACH	T _H [°C]	T _C [°C]	Q _{int} [W]	Q _{int} [W/m ²]
Dnevni boravak	1	0,5	22	26	170	12
Kuhinja + Blagovaonica	2	0,5	22	26	355	
Dječja spavaća soba	3	0,5	22	26	192	
Zahod	4	0,5	24	26	36	
Hodnik	5	0,5	20	26	13	
Bračna spavaća soba	6	0,5	22	26	63	

Tablica 3: Svojstva ovojnice PAR-a

VANJSKI ZID					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Gipsana ploča	20	0,35	1	750	0,394
OSB ploča ¹	20	0,13	1,8	650	
Blokovi od gline ^{2 3}	290	0,48	1	1800	
OSB ploča	20	0,13	1,8	650	
Kamena vuna	50	0,036	0,9	80	
Gipsana žbuka	10	0,7	1	1400	
POD					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Cementni estrih ⁴	50	1,6	1	2000	1,3
Armirani beton ⁵	100	2,6	1	2500	
Bitumen	10	0,169	1	1100	
Beton ⁶	100	2,5	1	2400	
Šljunak (Drenaža)	300	0,7	1	1800	
STROP					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Bukva/Hrast	200	0,2	2	800	0,18
Staklena vuna ⁷	150	0,035	1,03	30	
Crijep glina	50	0,48	1	1800	
UNUTARNJI ZID					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Bukva/Hrast	200	0,2	2	800	0,855

¹ <http://www.osb-info.org/technical.html>² file:///fsb.hr/FSB/Users/CADLab/ka185931/Downloads/04a_Zidovi_GK1_2015-16%20New%20Gen.pdf³ http://www.mgipu.hr/doc/energetskaucinkovitost/hrn_en_13790_primjeri%20proracuna_javna.pdf⁴ http://www.mgipu.hr/doc/energetskaucinkovitost/hrn_en_13790_primjeri%20proracuna_javna.pdf⁵ http://www.mgipu.hr/doc/energetskaucinkovitost/hrn_en_13790_primjeri%20proracuna_javna.pdf⁶ http://www.mgipu.hr/doc/energetskaucinkovitost/hrn_en_13790_primjeri%20proracuna_javna.pdf⁷ <http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/>

Plohe svih zona promatrane zgrade podijeljene su na vanjske i unutarnje zidove te strop i pod. Tablica 3 sadrži informaciju o svim građevnim materijalima koji su se koristili prilikom definiranja ploha koje opisuju pojedine prostorije. Također, navedene su debljine materijala te njihova termodinamička svojstva. Za sve materijale koji nisu pronađeni unutar baze programa TRNSYS naveden je izvor iz kojeg su se uzimali podaci o svojstvima materijala. Odabrani građevni materijali te njegov raspored i debljina za svaku plohu odabrani su nakon konzultacija sa studentima građevinskog i strojarškog fakulteta unutar studentske udruge "SUPEUS" te uz pomoć literature. Svojstva ostakljenja na svim ploham prikazuje Tablica 4.

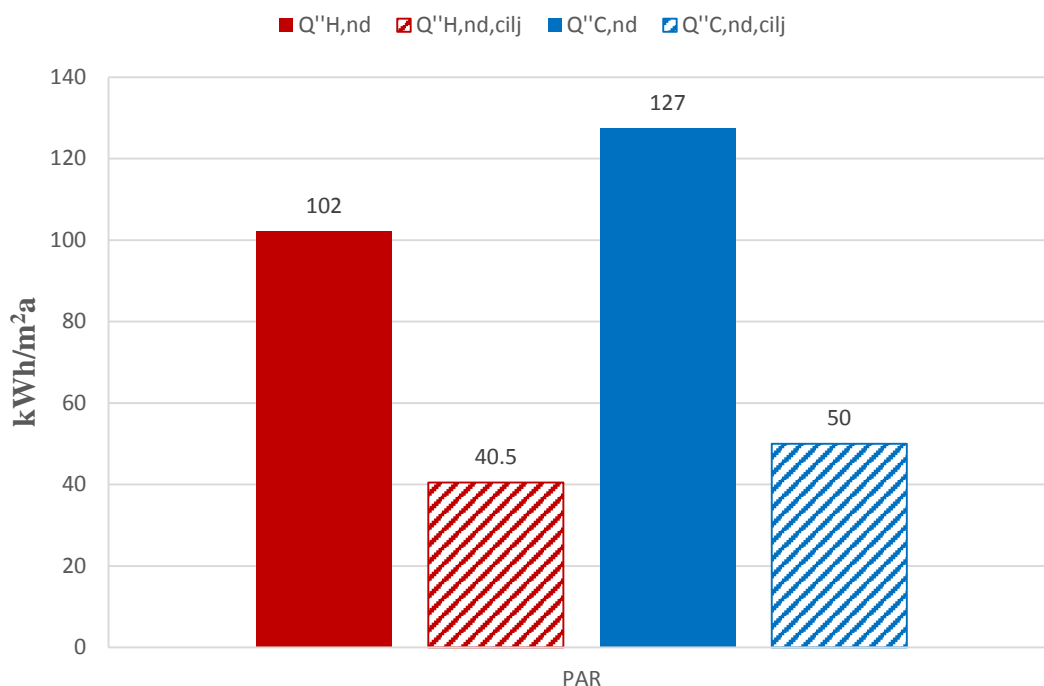
Tablica 4: Svojstva ostakljenja PAR-a

OSTAKLJENJA		
Debljina [mm]	U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	SHCG
4	2,83	0,755

Opis modela te rezultati simulacije PAR-a detaljnije su opisani u prethodnom radu, Projekta PE. Radi preglednijeg prikaza rezultati energetske simulacije početnog arhitektonskog rješenja su prikazani kao godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje, svedeni na korisnu površinu zgrade.

Rezultati energetske simulacije početnog arhitektonskog rješenja

Iz rezultata je vidljivo da potrebna energija za grijanje višestruko premašuje zadani cilj od $40,50 \text{ kWh}/\text{m}^2$, dok potrebna energija za hlađenje još više odstupa od željene vrijednosti. Razlog tome su veliki transmisijski gubici, ali i dobici kroz velike ostakljene površine na istočnoj i južnoj fasadi te neadekvatan sastav vanjske ovojnice. Na Slika 3 prikazane su potrošnja za grijanje (crveno) i hlađenje (plavo).



Slika 3: Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje početnog arhitektonskog rješenja za Zagreb

Zaključak analize:

Na temelju analize rezultata početnog arhitektonskog rješenja prvi prijedlog za smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje je zamjena svih ostakljenih površina s ostakljenjem boljih termodinamičkih svojstava, odnosno nižeg koeficijenta prolaza topline. Time bi se smanjili transmisijski gubici toplinske energije u sezoni grijanja te neznatno povećala potrebna energija za hlađenjem. Sastav građevnih ploha, geometrija te veličina ostakljenih površina ostaje ista. Navedeni prijedlog analizirat će se u nastavku.

2.2. Varijanta 1

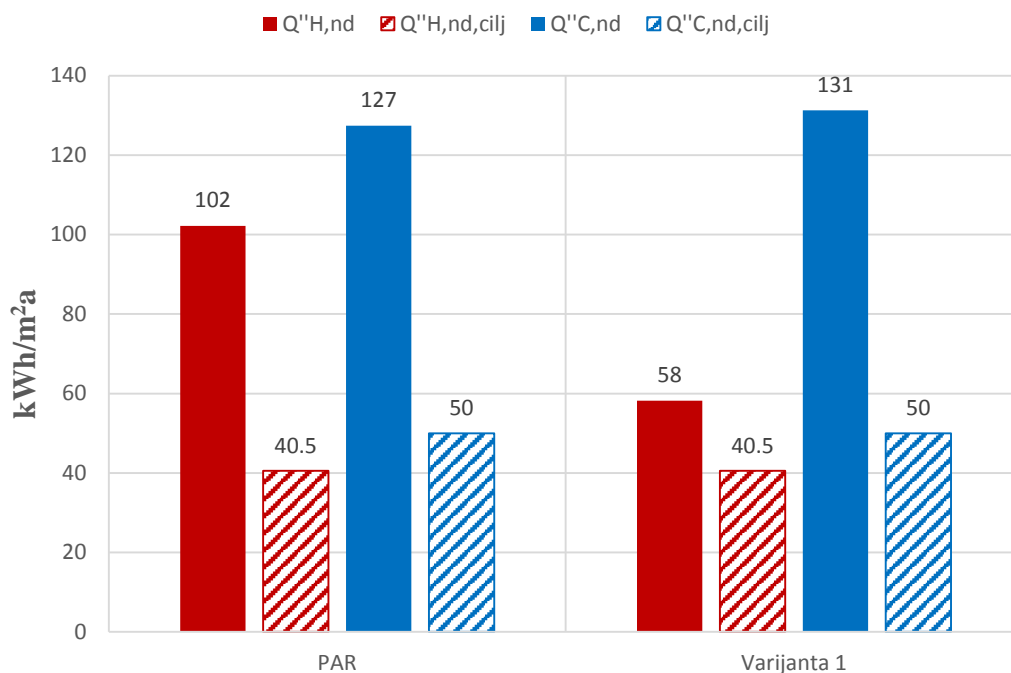
Predviđene izmjene početnog arhitektonskog rješenja primijenjene su na Varijanti 1. Sva vanjska ostakljenja kuće, točnije 40,89 m², zamijenjena su dvoslojnim Pilkington OPTITERM S ostakljenjem čiji je koeficijent prolaza topline manji za 63% u odnosu na PAR, a koeficijent toplinskih dobitaka od Sunca je manji za 38%. Svojstva novog tipa ostakljenja dana su u Tablica 5. Promijenjeni tip ostakljenja zadovoljava *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* koji nalaže da maksimalni dopušteni koeficijent prolaza topline ne smije prelaziti 1,2 W/m²K. Navedenom izmjenom nastoji se smanjiti potrebna godišnja energija za grijanje.

Tablica 5: Svojstva novog ostakljenja

OSTAKLJENJA			
Naziv	Debljina [mm]	U [W/m ² K]	SHCG
Pilkington OPTITHERM S #2	4	1,06	0,548

Rezultati simulacije Varijante 1

Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 1 ukazuju na smanjenje potrebne energije za grijanje te neznatno povećanje potrebne energije za hlađenje. Potrebna energija za grijanje smanjena je za 43% u odnosu na PAR, dok je potrebna energija za hlađenje uvećana za 3% (Slika 4). Drastično smanjenje potrebne energije za grijanje rezultat je smanjenih transmisivskih gubitaka kroz ostakljenja tijekom zimskih mjeseci.



Slika 4: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a i Varijante 1 za Zagreb

Zaključak analize:

Promjenom ostakljenja ostvario se željeni rezultat, odnosno djelomično se smanjila potrebna energija za grijanjem. No, u svrhu dodatnog smanjenja potrebne energije za grijanje predviđa se izmjena materijala neprozirnih građevnih elemenata te ispitivanje utjecaja debljine i vrste izolacijskih materijala na svim ploham. Osim smanjenja potrebne energije za grijanje, traži se optimum ekonomske isplativosti ulaganja u izolacijski materijal s obzirom na njegovu debljinu, vrstu i toplinska svojstva.

2.3. Varijanta 2

Materijali u Varijanti 2 promijenjeni su prema prijedlogu studenata građevinskog i arhitektonskog fakulteta unutar studentske udruge "SUPEUS". Tablica 6 sadrži redoslijed iterativnih scenarija s naznačenim promjenama materijala izolacije i građevnih materijala te pripadajućim promjenama njihovih debljina, promjenama i smanjenjem ukupnih koeficijenata prolaza topline u odnosu na PAR za svaku plohu te provjeru usklađenosti s *Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*. Za svaku plohu odabran je scenarij koji se usvaja za daljnju optimizaciju. Tablica 6 prikazuje utjecaj različitih vrsta i debljina izolacija te građevnih materijala na promjenu koeficijenta prolaza topline te u konačnici na promjenu potrebne energije za grijanje i hlađenje. Tražio se optimum koji zadovoljava ne samo smanjenu potrebnu energiju za grijanje, nego i ekonomsku isplativost te mogućnost jednostavne ugradnje u praksi. Također, jedan od ciljeva bio je da su građevni materijali lako dostupni, prirodnog porijekla, jeftini, nemaju veliki otisak na okoliš, a da pritom zadovoljavaju standarde niskoenergetske gradnje.

U odnosu na PAR, unutarnji zid zamijenjen je jelom zbog boljih toplinskih svojstava i jeftinije nabavke navedenog resursa.

Nakon razgovora sa studentima građevinskog fakulteta, ustanovilo se da je krov bolje izvesti u obliku drvenih hrastovih greda između kojih se postavlja tzv. brodski pod od jele smanjene debljine u odnosu na PAR. Staklena vuna postavlja se između greda na brodski pod, zatim se pokrivaju bitumenskom ljepenkam i kao pokrov se stavljaju valovite ploče od bitumena (Tablica 8). Zbog smanjenja koeficijenta prolaza topline nove konstrukcije krova, bilo je potrebno povećati debljinu staklene vune kako bi se zadržala željena termodinamička svojstva krova. Daljnjim povećanjem debljine izolacije staklene vune smanjen je koeficijent prolaza topline, no kako prikazuju Tablica 7 i Slika 5, jednostavni period povrata (JPP), odnosno cijena izolacije, se linearno povećava dok je smanjenje potrebne energije za grijanje zanemarivo (scenarij 4 i 5). JPP se računa kao omjer ukupne cijene investicije materijala i godišnje uštede na režijama za električnu energiju, pri čemu je cijena električne energije uzeta kao 1 kn/kWh. Ušteda električne energije procijenjena je na temelju ušteda potrebne toplinske

energije i pod pretpostavkom da se grijanje vrši dizalicom topline s $COP=3$, dakle, zanemarujući gubitke sustava predaje, distribucije i proizvodnje.

U odnosu na PAR, na pod je postavljen sloj kamene vune. Daljnjim povećanjem izolacije kamene vune na podu povećava se JPP (Tablica 7), dok se potrebna energija ostaje nepromijenjena (scenarij 8, Slika 5).

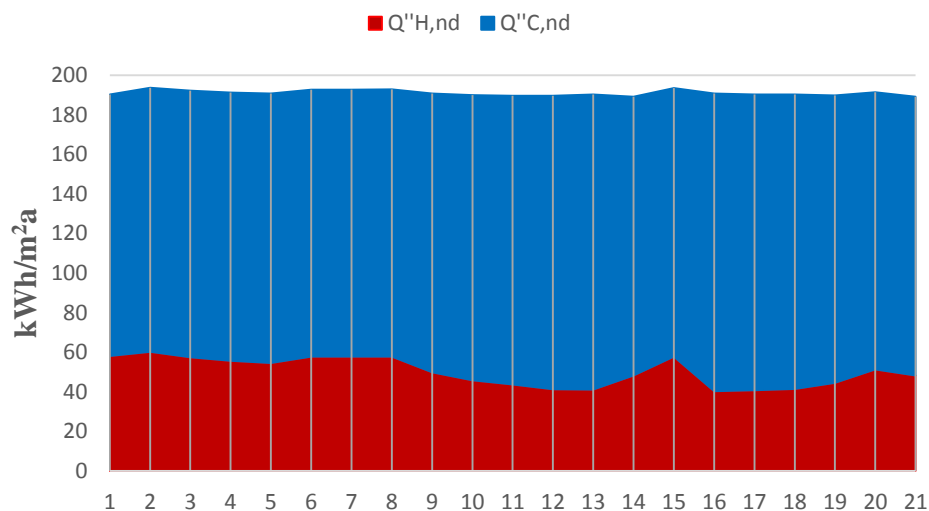
Najviše izmjena primijenjeno je na vanjskom zidu, gdje su u odnosu na PAR analizirani slučajevi povećanja debljine kamene vune. Također je analizirana mogućnost primjene slame za koju je pretpostavljeno da ima dvojnu ulogu, odnosno da se istovremeno koristi kao građevni i izolacijski materijal. Povećanjem debljine kamene vune uočen je ekstrem (Tablica 6, scenarij 12) iznad kojeg nije ekonomski opravdano ulagati u daljnju izolaciju s obzirom da JPP drastično raste (Tablica 7), dok se potrebna energija za grijanje zanemarivo smanjuje.

Proučavajući koncepte prirodne gradnje, uočeno je da balirana slama može biti izvrstan građevni, a ujedno i izolacijski materijal koji ima gotovo identična toplinska svojstva kao i kamena vuna (Tablica 8). Ako je sama konstrukcija kuće od drva, vanjski zidovi se popunjavaju s baliranom slamom gdje je za kuću od 70 m^2 potrebno oko 300 bala slame. Cijena po bali slame se kreće između 10 – 20 kn te je jednostavnim proračunom izračunato da JPP za baliranu slamu iznosi 16,1 godina (Tablica 7) u odnosu na kamenu vunu gdje se JPP kreće od 19,2 godina za 5 cm kamene vune pa naviše. Rezultati ukazuju na veliku prednost pri korištenju ovakvog rješenja budući da dovodi do ušteda ne samo građevnog, nego i na skupljeg izolacijskog materijala. Nakon usporedbe svih analiziranih slučajeva odabrani su za konačnu Varijantu 2 scenariji 1, 3, 7 i 18 (označeni narančastom bojom). Odabrani scenariji obuhvaćaju jelu kao građevni materijal unutarnjih zidova, 200 mm staklene vune kao izolacijski materijal i 15 mm jele kao građevni materijal krova, 100 mm kamene vune kao izolacijski materijal i 350 mm šljunka i betona kao građevni materijal poda te 350 mm balirane slame kao izolacijski i građevni materijal vanjskih zidova. Slika 5 prikazuje grafički kako svaki od scenarija utječe na smanjenje potrebne energije na grijanje i istovremeno povećanje potrebne energiju za hlađenje. Suma specifičnih potrebnih godišnjih energija za grijanje i hlađenje ostaje gotovo nepromijenjena kroz svih 13 analiziranih scenarija promjene vanjske ovojnice. Konačan popis materijala s pripadajućim svojstvima i debljinama slojeva svih ploha Varijante 2 prikazuje Tablica 8.

Tablica 6: Opis analiziranih scenarija promjene svojstava neostakljenih površina za Zagreb

Unutarnji zid							
Scenarij	Izolacija	Debljina [mm]	Građevni Materijal	Debljina [mm]	U [W/m ² K]	Smanjenje U u odnosu na PAR	Zadovoljava Teh. propis
PAR	/	/	Hrast	200	0,855	/	ne
1	/	/	Jela	200	0,588	-31%	da
Krov							
PAR	Staklena vuna	150	Hrast	200	0,17	/	da
2	Staklena vuna	150	Jela	15	0,215	+26%	da
3	Staklena vuna	200	Jela	15	0,165	-3%	da
4	Staklena vuna	250	Jela	15	0,133	-22%	da
5	Staklena vuna	300	Jela	15	0,108	-36%	da
Pod							
PAR	/	/	Beton/šljunak	350	1,681	/	ne
6	Kamena vuna	50	Beton/šljunak	350	0,505	-70%	ne
7	Kamena vuna	100	Beton/šljunak	350	0,295	-82%	da
8	Kamena vuna	150	Beton/šljunak	350	0,211	-87%	da
Vanjski zid							
PAR	Kamena vuna	50	Glineni blok	290	0,39	/	ne
9	Kamena vuna	100	Glineni blok	290	0,259	-34%	da
10	Kamena vuna	150	Glineni blok	290	0,188	-52%	da
11	Kamena vuna	200	Glineni blok	290	0,149	-62%	da
12	Kamena vuna	300	Glineni blok	290	0,106	-73%	da
13	Kamena vuna	300	Drvo	290	0,091	-77%	da
14	Ovčja vuna ⁸	250	Drvo	200	0,123	-68%	da
15	/	/	Drvo	300	0,405	4%	da
16	Kamena vuna	300	Slama	290	0,066	-83%	da
17	Kamena vuna	100	Slama	240	0,116	-70%	da
18	/	/	Slama	350	0,121	-69%	da
19	Slama + Zemlja ⁹	150	Glineni blok	200	0,18	-54%	da
20	Drvena vlakna ¹⁰	100	Glineni blok	200	0,293	-25%	da
21	Drvena vlakna	150	Kamen	300	0,241	-38%	da

⁸ <http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/>⁹ "Toplinska svojstva građevnih materijala" – 3. predavanje predmeta "Građevinska fizika, GF Zagreb¹⁰ <http://www.greenspec.co.uk/building-design/woodfibre-insulation-intro/>, "Toplinska svojstva građevnih materijala" – 3. predavanje predmeta "Građevinska fizika, GF Zagreb



Slika 5: Usporedba potrošnje energije za grijanje i hlađenje svih iterativnih slučajeva za Zagreb

Tablica 7: Usporedba cijena i procijenjeni jednostavni periodi povrata za izolacijske materijale za Zagreb

Staklena vuna					
Debljina dodane izolacije u odnosu na PAR [mm]	Cijena izolacije, [kn/m ²]	Ukupna cijena [kn]	Godišnja ušteda el. energije [kWh]	Cijena električne energije [kn/kWh]	JPP
50	18	1260	30	1	41,5
100	36	2520	49	1	51,4
150	54	3780	62	1	61,3
Kamena vuna					
50	50	3500	183	1	19,2
100	100	7000	274	1	25,5
150	150	10500	323	1	32,5
250	250	17500	378	1	46,3
Drvena vlakna					
100	170	11900	149	1	79,7
150	120	8400	218	1	38,6
Ovčja vuna					
250	200	14000	218	1	64,3
Balirana slama					
Količina, kom	Cijena, po kom	Ukupna cijena [kn]	Godišnja ušteda el. energije [kWh]	Cijena električne energije [kn/kWh]	JPP
300	20	6000	373	1	16,1

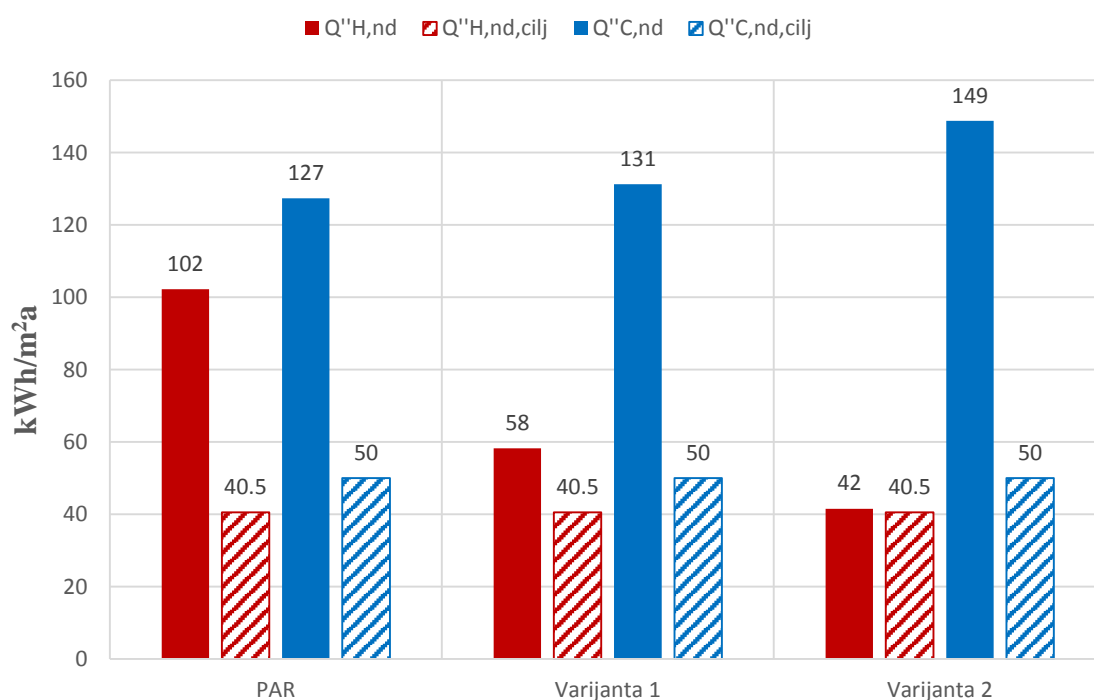
Tablica 8: Svojstva i debljine materijala svih ploha Varijante 2 za Zagreb

VANJSKI ZID					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
OSB ploča	20	0,13	1,8	650	0,121
Balirana slama ¹¹	350	0,045	2	100	
OSB ploča	20	0,13	1,8	650	
Gipsana žbuka	10	0,7	1	1400	
POD					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Cementni estrih	50	1,6	1	2000	0,297
Armirani beton	100	2,6	1	2500	
Kamena vuna	100	0,036	0,9	80	
Bitumen	5	0,169	1	1100	
Beton	100	2,5	1	2400	
Šljunak (Drenaža)	200	0,7	1	1800	
STROP					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Brodski pod (Smreka/Jela)	15	0,13	2	600	0,155
Staklena vuna	200	0,035	1,03	30	
Bitumen	5	0,169	1	1100	
Valovita ploča (Bitumen)	70	0,169	1	1100	
UNUTARNJI ZID					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Smreka/Jela	200	0,13	2	600	0,588

¹¹
https://www.researchgate.net/publication/313411984_Thermal_Conductivity_of_Straw_Bales_Full_Size_Measurements_Considering_the_Direction_of_the_Heat_Flow

Rezultati simulacije Varijante 2

Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 2 ukazuju na smanjenje potrebne energije za grijanje te povećanje potrebne energije za hlađenje. Potrebna energija za grijanje smanjena je za 59% u odnosu na PAR, dok je potrebna energija za hlađenje uvećana za 17% (Slika 6). Drastično smanjenje potrebne energije za grijanje rezultat je poboljšanja termodinamičkih svojstava ovojnice, odnosno zamjene ciglenih blokova baliranom slamom te dodavanjem izolacije na pod i strop. Koeficijenti prolaza topline su sukladni zahtjevima *Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*.



Slika 6: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1 i Varijante 2 za Zagreb

Zaključak analize:

Promjenom materijala ovojnice te ekonomski optimalnim povećanjem izolacije postignuti su željeni rezultati u smjeru dodatnog smanjenja potrebne energije za grijanje. Postignut je optimum između početnog ulaganja, operativnih troškova te ekološkog otiska na okoliš. Međutim, optimizacija ovojnice za režim grijanja dovela je do povećanja energije za hlađenje u odnosu na PAR. Stoga je za Varijantu 3 predviđena optimizacija geometrije i orijentacije kuće te veličina ostakljenih površina i otvora unutar kuće u cilju smanjenja potrebne energije za grijanje i hlađenje.

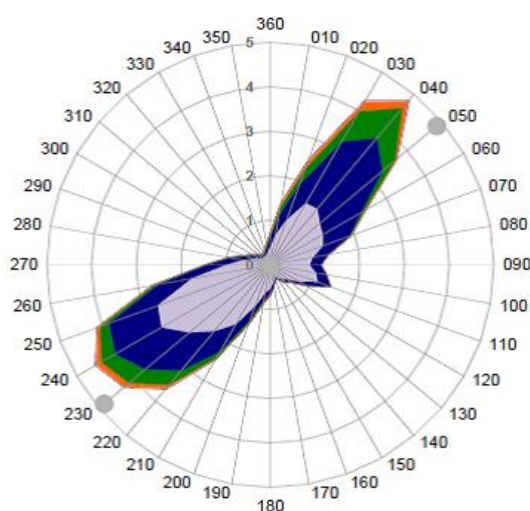
2.4. Varijanta 3

Varijantom 3 analiziran je utjecaj povezanost promjene geometrije i orijentacije kuće zajedno sa promjenom veličine ostakljenja i otvora unutar kuće radi smanjenja potrebne energije za grijanje i hlađenje. Za analizu se koristila kombinacija TRNSYS-a i CoolVent-a, programskog alata za simulaciju pasivnog hlađenja korištenjem prirodne ventilacije. CoolVent-om se ispitivao utjecaj promjene orijentacije kuće te veličine ostakljenja i otvora unutar kuće u svrhu postizanja pasivnog hlađenja, dok se u TRNSYS-u, sukladno promjenama, mijenjala geometrija kuće. Promjenom orijentacije dnevnog boravka te kuhinje i blagovaonice iz orijentacije istok na orijentaciju jug te orijentacije spavaćih soba i zahoda iz orijentacije zapad na orijentaciju sjever osigurala se toplinska ugodnost u dnevnom boravku te kuhinji i blagovaoni na južnoj strani u zimskim mjesecima dok se također osiguralo smanjeno toplinsko opterećenje spavaćih soba na sjevernoj strani u ljetnim mjesecima. Poprečna ventilacija u smjeru sjever-jug osigurava pasivno hlađenje svih prostorija. Ulazna, odnosno stražnja vrata, nalaze se na istoku odnosno zapadu te ih spaja dugačak hodnik koji ujedno dijeli prostorije na sjeveru i jugu. Strujanjem zraka kroz hodnik u smjeru istok-zapad uslijed prirodne ventilacije osigurano je dodatno pasivno hlađenje centralnog dijela kuće.

Odabrana je poprečna ventilacija s vjetrom kao pogonskom silom s obzirom da kuća nije dovoljno visoka za pasivno hlađenje korištenjem sile uzgona. Cilj poprečne ventilacije je ventiliranje prostorija kako bi se postiglo pasivno hlađenje ukoliko su vanjski uvjeti zadovoljavajući, odnosno ako je vanjska temperatura niža od postavnih temperatura u

prostorijama. Kod navedenog tipa ventilacije se prilikom nastrujavanja vjetra na vanjski zid kuće stvara pretlak, a na ostalima podtlak. Uslijed razlike tlaka na pretlačnoj i podtlačnoj strani kroz prostorije se ostvaruje strujanje hladnijeg okolišnog zraka koji na sebe preuzima toplinu iz prostora te zagrijan izlazi iz prostorije. Utjecaj na intenzitet strujanja zraka imaju površine otvora na vanjskom zidu odnosno ostakljenja te površine otvora unutar kuće. Rezultat je smanjenje toplinskih opterećenja, akumulacija rashladnog učina u ovojnici zgrade te konačno, smanjenje potrebne energije za hlađenje. Protok zraka ovisi o razlici tlakova na vanjskim zidovima, korisnoj površini prozora te padu tlaka kroz prostorije. Važna pretpostavka korištenog programa je da su prozori otvoreni tijekom cijelog vremena korištenja kuće (uključivo noću), ako nije naznačeno drugačije.

U CoolVent-u je bilo potrebno unijeti i površine svih otvora unutar kuće koji se koriste za prestrujavanje zraka između prostorija (kao na primjer vrata unutar kuće) te su one za Varijantu 3 iznosile 10 m^2 . Nadalje, bilo je potrebno definirati i orijentaciju zgrade te unutarnje dobitke koji prema PAR-u iznose u prosjeku 12 W/m^2 . Vrijeme korištenja kuće određeno je od 0 do 24 sati. Simulacija je provedena za tipičnu meteorološku godinu za Grad Zagreb, za mjesece u kojima postoji potreba za hlađenjem, odnosno od početka travnja do kraja listopada. Pri tome je za svaki mjesec simuliran tipični dan korištenjem satnog vremenskog koraka. Smjer strujanja te jakost vjetra tijekom tipične meteorološke godine za Grad Zagreb prikazan je ružom vjetrova (Slika 7).



Slika 7: Ruža vjetrova za Grad Zagreb

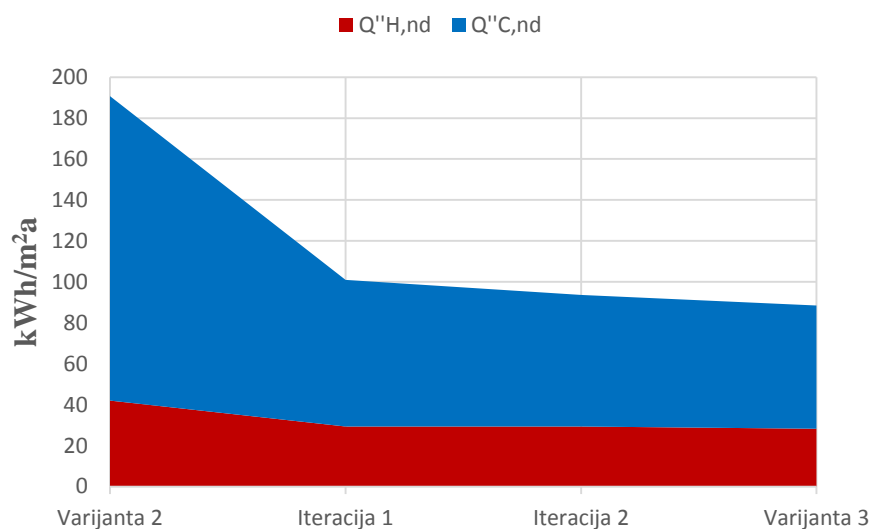
Izvor: <http://www.crocontrol.hr/mobile/default.aspx?id=3457>

Rezultati simulacije Varijante 3

Tablica 9 prikazuje odnos Varijante 3 u odnosu na Varijantu 2 gdje su prikazani i iteracijski međukoraci kako bi se uočila povezanost između smanjenja površine ostakljenja i ukupne specifične energije za grijanje i hlađenje (Slika 8). Promjenom geometrije, orijentacije te smanjenjem površine ostakljenja za 62% u prvoj iteraciji, smanjena je ukupna potrebna energija za grijanje i hlađenje za 47% u odnosu na Varijantu 2, od čega 29% za grijanje i 52% za hlađenje. Daljnjim smanjenjem površine ostakljenja za 66% u drugoj iteraciji, gdje je zanemaren prozor na zapadu u zahodu te premješten prozor u spavaćoj sobi s istoka na sjever, smanjila se potrebna energija za grijanje i hlađenje za 51% u odnosu na Varijantu 2, 29% za grijanje, 57% za hlađenje. Konačno, smanjenjem ostakljenja za 70% u Varijanti 3, koje je ostvareno zanemarivanjem prozora na zapadu u dnevnom boravku, potrebna energija za grijanje i hlađenje smanjila se za 54% u odnosu na Varijantu 2, 32% za grijanje, 60% za hlađenje. Dodatno smanjenje potrebne energije za hlađenje ostvareno je dodavanjem 50 mm akumulacijske mase na podu.

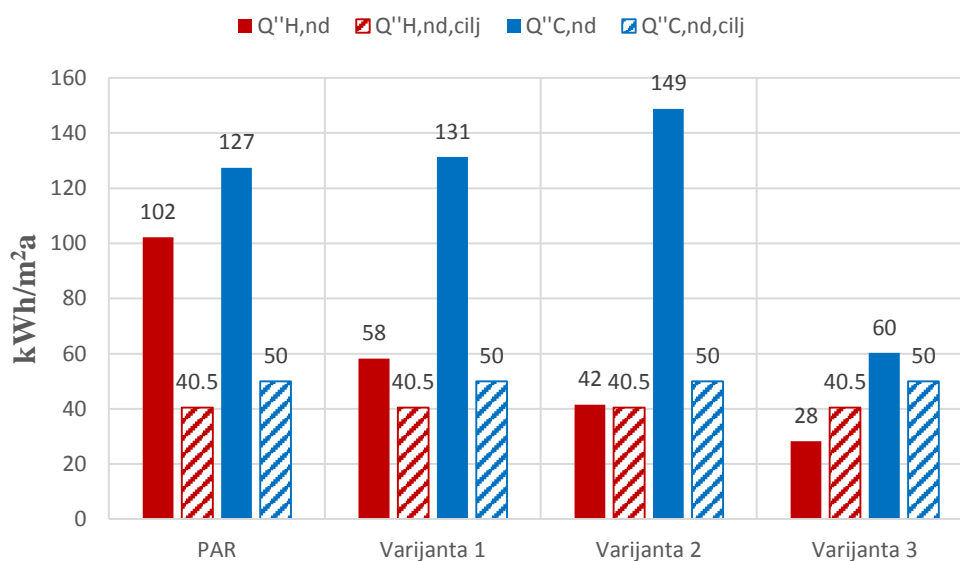
Tablica 9: Usporedba parametara između Varijante 2, iteracijskih međukoraka i Varijante 3 za Zagreb

Iteracija	Orijentacija	$Q''_{H,nd}$ [kWh/m ² a]	$Q''_{C,nd}$ [kWh/m ² a]	$Q''_{UK,nd}$ [kWh/m ² a]	Ostakljenje [m ²]	Smanjenje ostakljenja	Smanjenje $Q''_{UK,nd}$
Varijanta 2	Istok - Zapad	42	149	190	40,89		
1	Jug - Sjever	29	72	101	15,63	-62%	-47%
2	Jug - Sjever	29	64	93	13,95	-66%	-51%
Varijanta 3	Jug - Sjever	28	60	88	12,27	-70%	-54%



Slika 8: Usporedba potrebne energije za grijanje i hlađenje između Varijante 2, iteracijskih međukoraka i Varijante 3 za Zagreb

Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 3 ukazuju na smanjenje potrebne energije za grijanje i za hlađenje. Potrebna energija za grijanje smanjena je za 72% u odnosu na PAR, dok je potrebna energija za hlađenje umanjena za 53% (Slika 9).



Slika 9: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2 i Varijante 3 za Zagreb

Zaključak analize

Varijantom 3 drastično je smanjena potrebna energija za hlađenje, pri čemu je smanjenje u ovoj varijanti ostvareno isključivo optimizacijom orijentacije kuće, prozora i veličine ostakljenja, dok je utjecaj pasivnog hlađenja na dodatno smanjenje potrebne energije za hlađenje prikazan u Varijanti 5. Orijentacija kuće je prilagođena ruži vjetrova za Grad Zagreb za mjesec u kojima postoji potreba za hlađenjem. U Varijanti 4 ispitat će se utjecaj vanjskog zasjenjenja radi daljnjeg smanjenja potrebne energije za hlađenje.

2.5. Varijanta 4

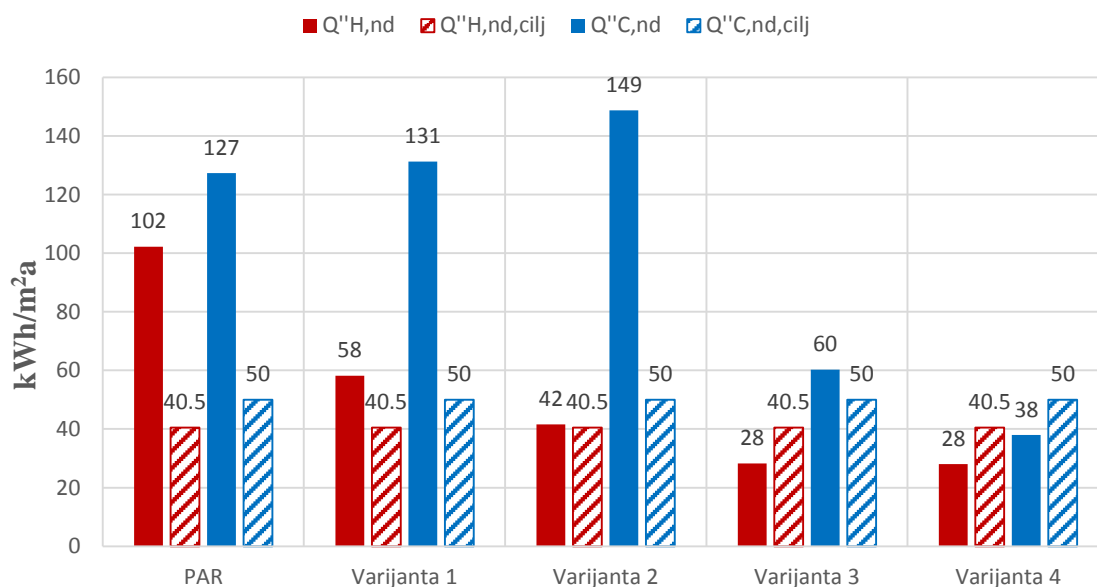
Cilj Varijante 4 jest optimizacija vanjskog zasjenjenja u ovisnosti o direktnom Sunčevom zračenju u svrhu smanjenja potrebne energije za hlađenje. Tablica 10 ispitan je utjecaj načina upravljanja vanjskim zasjenjenjem, odnosno granične vrijednosti zračenja kod kojeg se zasjenjenje otvara i zatvara. Vanjska zasjenjenja postavljena su na južnim i istočnim ostakljenjima. Minimalno zračenje kod kojeg se zasjenjenje otvara uzeto je $83,3 \text{ W/m}^2$ koje nalaže *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*. Mijenjanjem vrijednosti maksimalnog zračenja kod kojeg se zasjenjenje zatvara, mijenja se i potrebna energija za hlađenje. Detaljnom provjerom satnih podataka za direktno zračenje na južnu i istočnu plohu uočila se maksimalna ozračenost od $972,2 \text{ W/m}^2$ dok prosjek iznosi $416,7 \text{ W/m}^2$. Uvođenjem vanjskog zasjenjenja povećala se potrebna energija za grijanje, no budući da se zasjenjenje koristi samo u ljetnom periodu, povećanje energije za grijanje se zanemaruje.

Rezultati simulacije Varijante 4

Odabrana je Varijanta 4 kod koje se zasjenjenje otvara pri vrijednosti Sunčevog zračenja od $83,3 \text{ W/m}^2$ a zatvara pri $416,7 \text{ W/m}^2$. Ovakav način upravljanja dovodi do smanjenja potrebne energije za hlađenje od 36% u odnosu na Varijantu 3 te iznosi 28 kWh/m^2 . Potrebna energija za hlađenje umanjena je za 71% u odnosu na PAR (Slika 10).

Tablica 10: Usporedba parametara zasjenjenja između Varijante 3, iteracijskih međukoraka i Varijante 4 za Zagreb

Iteracija	Otvaranje, za Q_{zr} [W/m ²]	Zatvaranje, za Q_{zr} [W/m ²]	$Q''_{C,nd}$ [kWh/m ² a]	Smanjenje $Q''_{C,nd}$
Varijanta 3	/	/	60	
1	83,3	182,2	34	-43%
2	83,3	277,8	35	-41%
3	83,3	555,6	46	-24%
Varijanta 4	83,3	416,7	38	-36%



Slika 10: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3 i Varijante 4 za Zagreb

Zaključak analize

Dodavanjem vanjskog zasjenjenja na vanjska ostakljenja te optimizacijom otvorenosti i zatvorenosti zasjenjenja u ovisnosti o direktnom Sunčevom zračenju na plohe ostvareno je željeno smanjenje potrebne energije za hlađenje. Konačno, cilj Varijante 5 bio je uz pomoć CoolVent-a simulirati pasivno hlađenje korištenjem prirodne ventilacije za daljnje smanjenje potrebne energije za hlađenje.

2.6. Varijanta 5

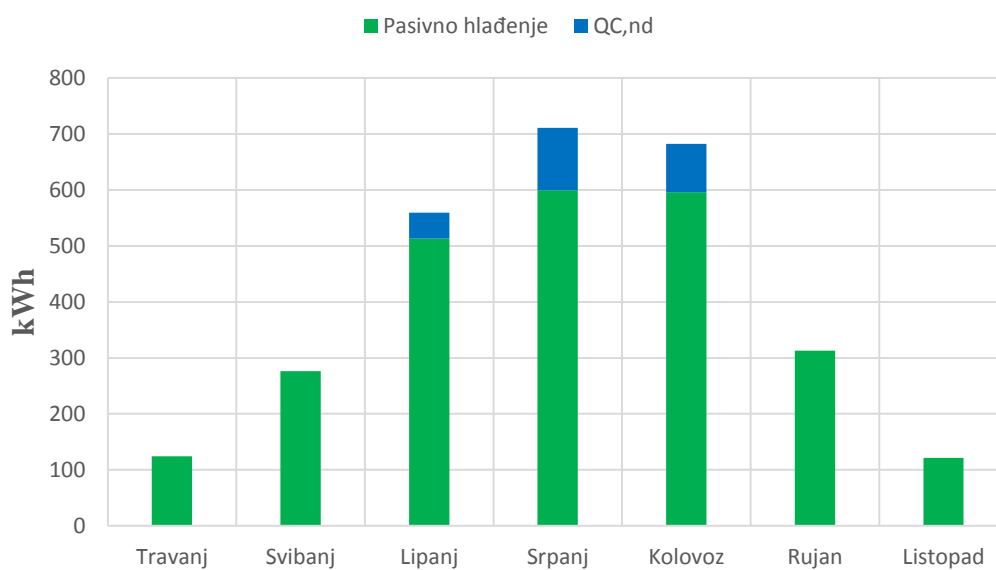
Na temelju postavne temperature u svim prostorijama kuće analiziran je utjecaj pasivnog hlađenja na potrebnu energiju za hlađenje. Pretpostavljeno je da ukoliko rezultati simulacije pokažu da je temperatura u svim prostorijama niža od postavne temperature od 26°C, nema potrebe za mehaničkim hlađenjem. Analiza je napravljena u CoolVent-u za svaki sat tipičnog dana u mjesecu od travnja do listopada.

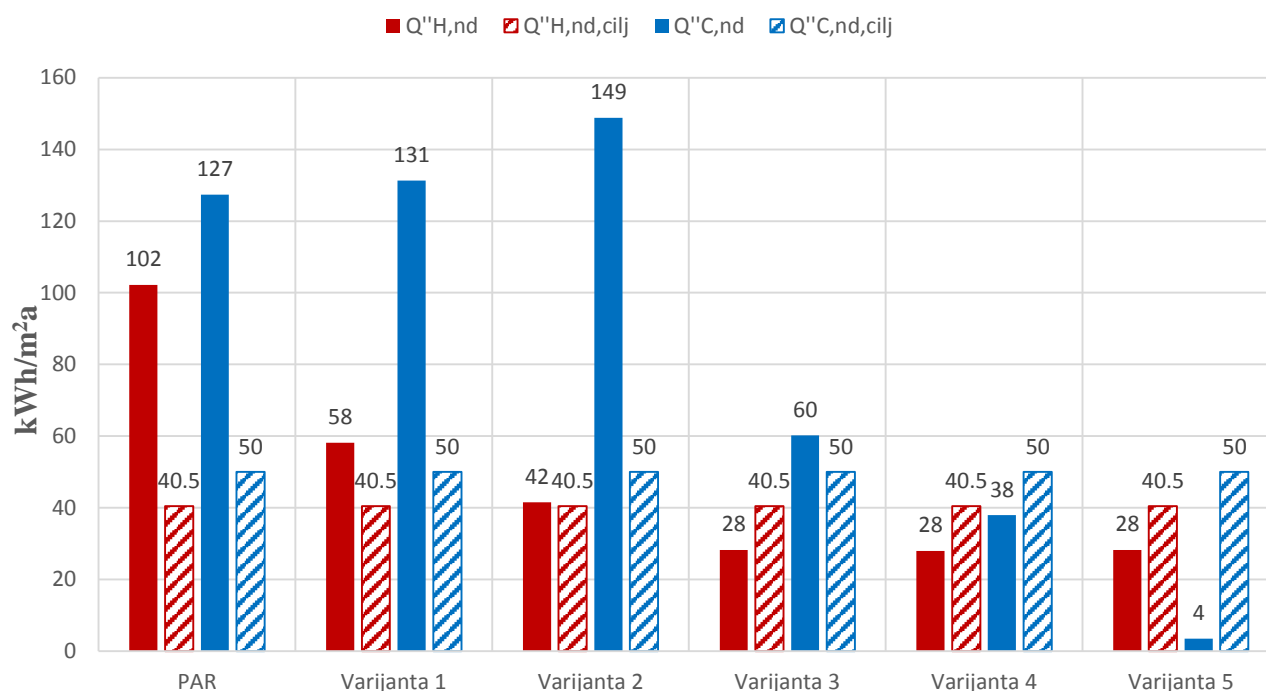
Rezultati simulacije Varijante 5

Analiza Varijante 5 pokazala je da se pasivno hlađenje uspješno ostvariti u prijelaznim mjesecima te da se drastično smanjila potreba za mehaničkim hlađenjem za ljetne mjesece. Rezultati ukazuju da je mehaničko hlađenje potrebno samo 9% vremena (66 sati) u lipnju, 19% vremena (137 sati) u srpnju te 14% vremena (106 sati) u kolovozu. Tablica 11 prikazuje razliku između potrebne energije za hlađenje bez i s pasivnim hlađenjem za prijelazne i ljetne mjesece. Slika 11 prikazuje udio potrebne energije za hlađenje koji je moguće ostvariti korištenjem pasivnog hlađenja (prirodnom ventilacijom). Rezultati ukazuju da je Varijantom 5 ostvaren učinkovit dizajn kuće s obzirom da je hlađenje u prijelaznim mjesecima moguće ostvariti isključivo korištenjem pasivnog hlađenja. Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 5 ukazuju na smanjenje potrebne energije za hlađenje u odnosu na PAR, pri čemu je potrebna energija za hlađenje umanjena za 97% (Slika 12).

Tablica 11: Usporedba potrebne energije za hlađenje bez i s pasivnim hlađenjem za Zagreb

Mjesec	Potrebna energija za hlađenje bez pasivnog hlađenja [kWh]	Potrebna energija za hlađenje uz pasivno hlađenje [kWh]	Ušteda
Travanj	124	0	100%
Svibanj	276	0	100%
Lipanj	513	47	91%
Srpanj	599	111	81%
Kolovoz	596	86	86%
Rujan	313	0	100%
Listopad	121	0	100%
UKUPNO	2543	244	90%

**Slika 11: Udio potrebne energije za hlađenje ostvaren korištenjem pasivnog hlađenja za Zagreb**

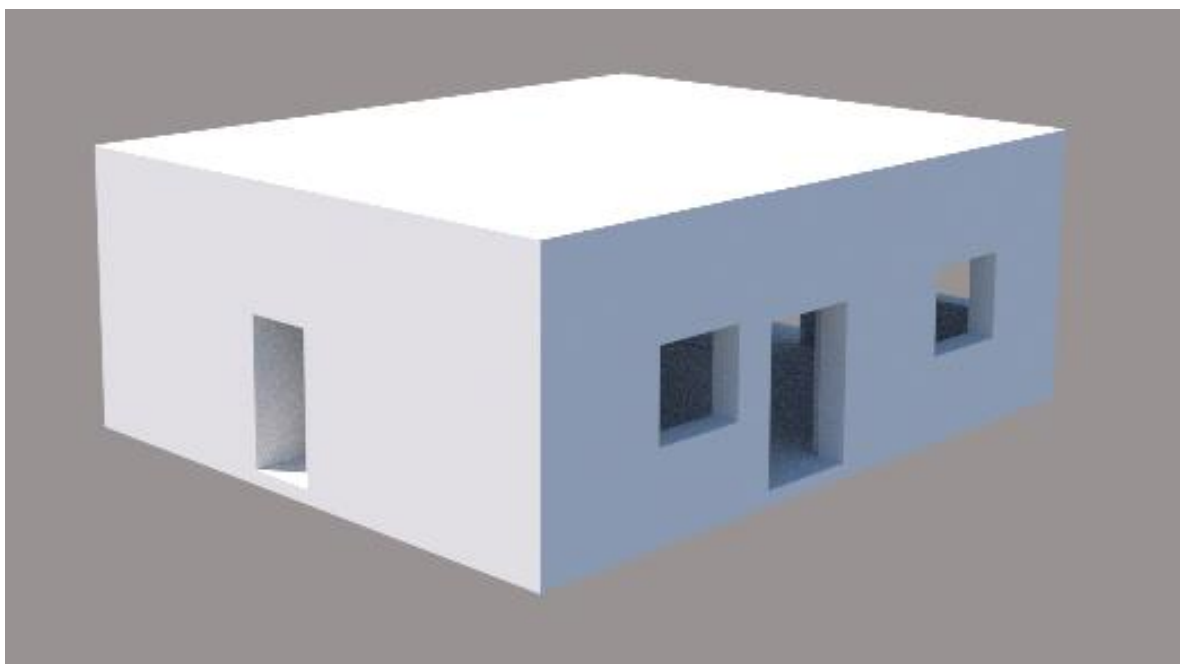


Slika 12: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3, Varijante 4 i Varijante 5 za Zagreb

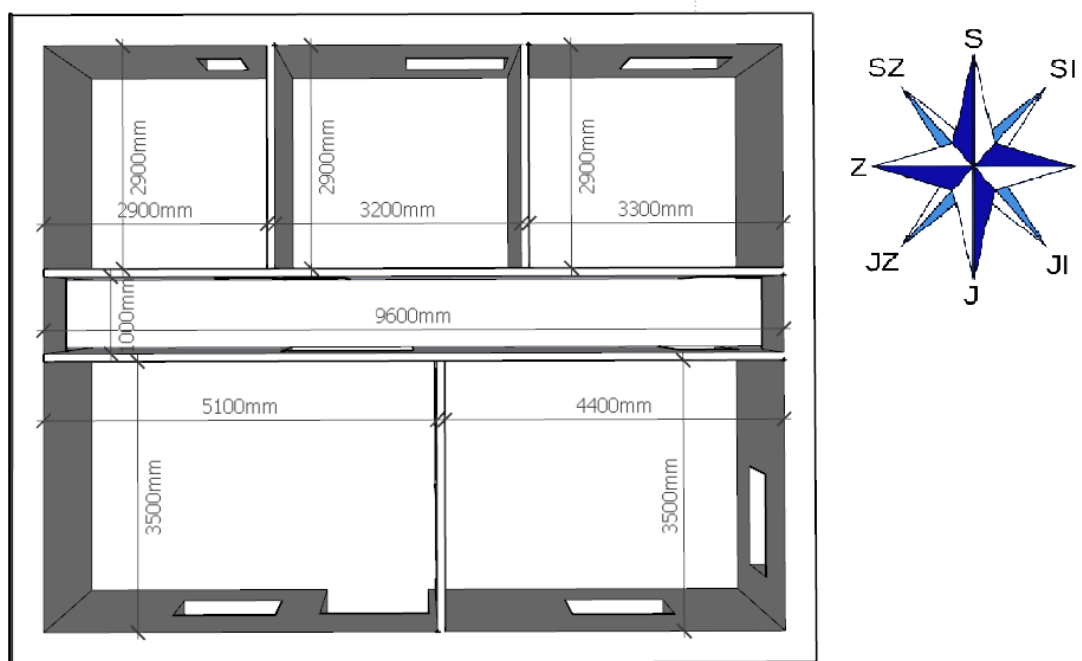
Zaključak analize

Primjenom prirodne ventilacije u svrhu pasivnog hlađenja, u Varijanti 5 drastično je smanjena potrebna energija za hlađenje. Međutim, rezultate simulacije u Varijanti 5 potrebno je promatrati s dozom opreza jer korišteni meteorološki podaci predstavljaju tipičnu meteorološku godinu koja je srednja vrijednost meteoroloških podataka za zadnjih 20 godina. S obzirom na utjecaj globalnog zatopljenja, u zadnjim godinama zabilježene su temperature vanjskog zraka u ljetnim mjesecima (lipanj, srpanj i kolovoz) znatno više od onih definiranih u tipičnoj meteorološkoj godini. Stoga nije realno za očekivati da se u ljetnim mjesecima hlađenje može ostvariti pasivnim hlađenjem, barem ne u mjeri koju sugeriraju rezultati provedene analize. Ako se zanemari pasivno hlađenje u navedenim ljetnim mjesecima potrebna energija za hlađenje iznosi 25 kWh/m^2 , što je i dalje manje od ciljane vrijednosti. Međutim, glavni cilj simulacije bio je pokazati kako se u prijelaznim mjesecima hlađenje ipak može ostvariti isključivo korištenjem pasivnog hlađenja, što dovodi do značajnog smanjenja potrebne energije za hlađenjem.

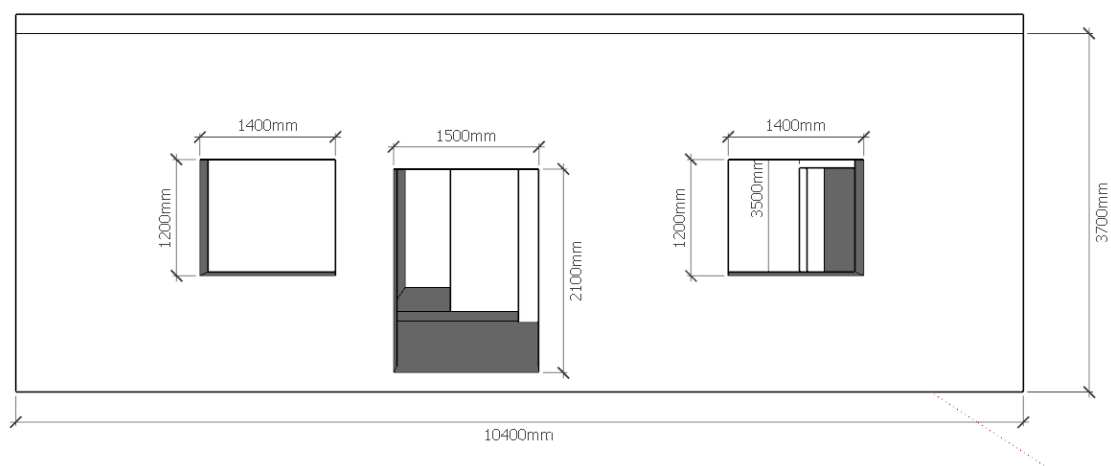
Optimizacija je izvršena za početno arhitektonsko rješenje (PAR) gdje potrebna energija za grijanje iznosi 102 kWh/m^2 , a za hlađenje 127 kWh/m^2 . Optimizacija je uključivala promjenu termodinamičkih svojstava prozirnih i neprozirnih građevnih materijala u Varijanti 1 i Varijanti 2, promjenu orijentacije i geometrije PAR-a te smanjenje ostakljenih površina u Varijanti 3, utjecaj zasjenjenja vanjskih ostakljenja u Varijanti 4 te integraciju strategije pasivnog hlađenja u Varijanti 5. Nakon završene optimizacije potrebna energija za grijanje iznosi 28 kWh/m^2 , a za hlađenje 4 kWh/m^2 , čime je zadovoljen *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* prema kojem ukupna godišnja potrebna energija za grijanje u kategoriji niskoenergetskih obiteljskih kuća mora biti manja od $40,50 \text{ kWh/m}^2$ za kontinentalnu Hrvatsku, a za hlađenje manja od 50 kWh/m^2 . Konačan izgled niskoenergetske kuće za Zagreb prikazuju Slika 13, Slika 14, Slika 15, Slika 16 te Slika 17.



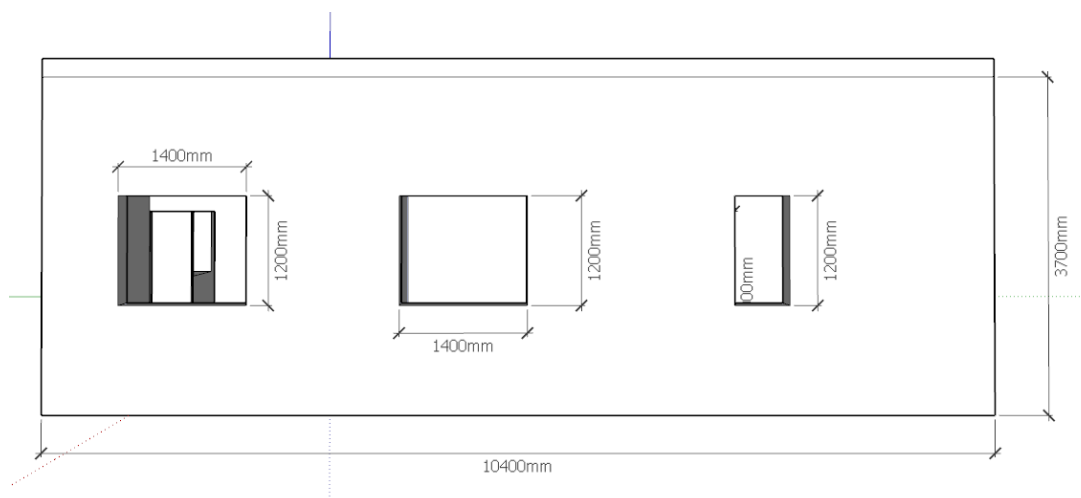
Slika 13: Konačno arhitektonsko rješenje obiteljske kuće za Zagreb



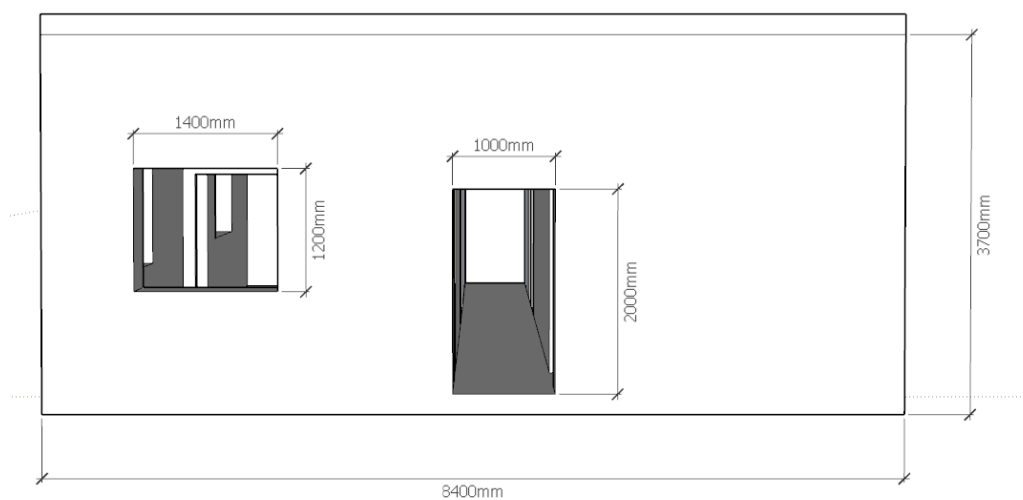
Slika 14: Konačno arhitektonsko rješenje za Zagreb – tlocrt



Slika 15: Konačno arhitektonsko rješenje za Zagreb – pogled prema dnevnom boravku te kuhinji i blagovaonici na jugu



Slika 16: Konačno arhitektonsko rješenje za Zagreb – pogled prema spavaćim sobama i zahodu na sjeveru



Slika 17: Konačno arhitektonsko rješenje za Zagreb – pogled prema ulaznim vratima, hodniku i istočnom prozoru kuhinje

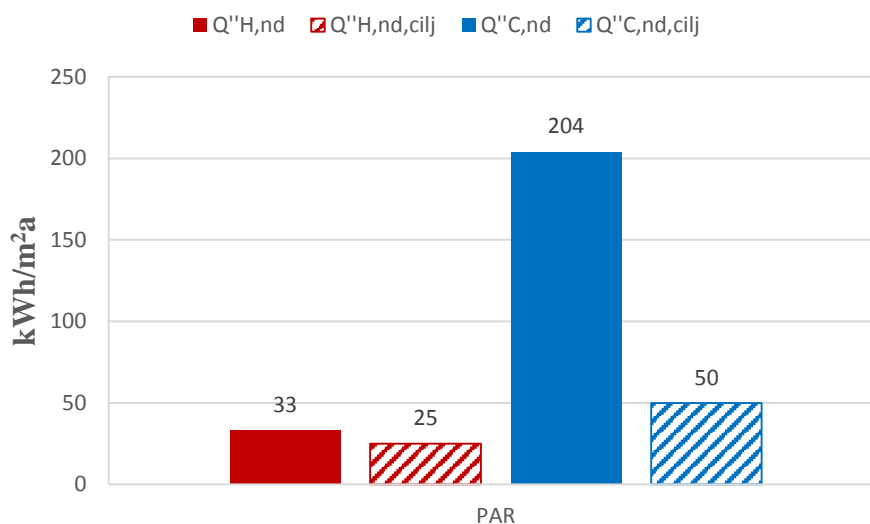
3. Optimizacija arhitektonskog rješenja kuće za Split

3.1. Početno arhitektonsko rješenje (PAR)

Svi ulazni parametri te informacije o PAR-u za Split identični su kao i za Zagreb (2.1) osim podataka o vanjskim vremenskim uvjetima gdje su korišteni podaci za tipičnu meteorološku godinu za mjernu postaju Split, Marjan.

Rezultati energetske simulacije početnog arhitektonskog rješenja

Iz rezultata je vidljivo da potrebna energija za grijanje neznatno premašuje zadani cilj od $24,84 \text{ kWh/m}^2$, dok je potrebna energija za hlađenje višestruko veća od zadanog cilja. Razlog velike potrebe za hlađenjem javlja se zbog dobitaka kroz velike ostakljene površine na istočnoj i južnoj fasadi te neadekvatnog sastava vanjske ovojnice. Slika 18 pokazuje potrebnu energiju za grijanje (crveno) i hlađenje (plavo).



Slika 18: Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje PAR-a za Split

Zaključak analize:

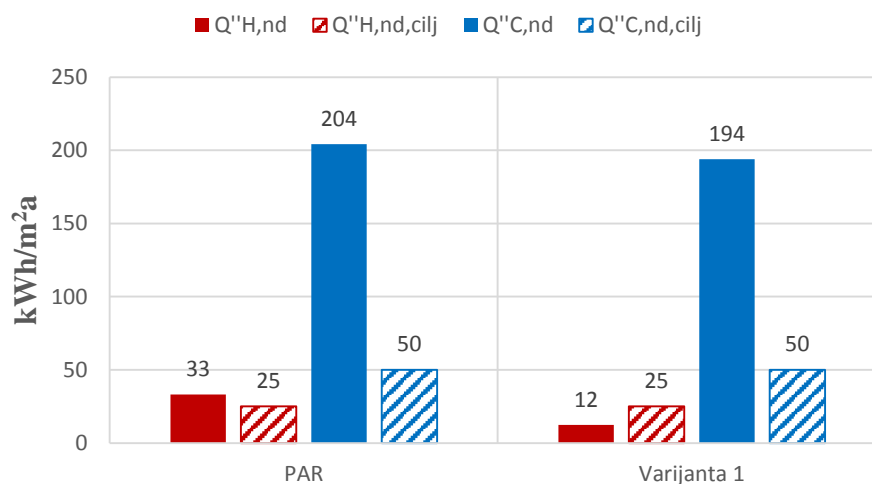
Na temelju analize rezultata početnog arhitektonskog rješenja prvi prijedlog za smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje je zamjena svih ostakljenih površina s ostakljenjem boljih termodinamičkih svojstava, odnosno nižeg koeficijenta prolaza topline. Sastav građevnih ploha, geometrija te veličina ostakljenih površina ostaje ista kao i za PAR.

3.2. Varijanta 1

Predviđene izmjene početnog arhitektonskog rješenja primijenjene su na Varijanti 1 s istim tipom ostakljenja kao i za grad Zagreb (Tablica 5).

Rezultati simulacije Varijante 1

Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 1 ukazuju na smanjenje potrebne energije za grijanje te smanjenje potrebne energije za hlađenje. Potrebna energija za grijanje smanjena je za 63% u odnosu na PAR, dok je potrebna energija za hlađenje umanjena za 5% (Slika 19). Smanjenje potrebne energije za grijanje rezultat je smanjenih transmisijskih gubitaka kroz ostakljenja tijekom zimskih mjeseci.



Slika 19: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a i Varijante 1 za Split

Zaključak analize:

Promjenom ostakljenja ostvario se željeni rezultat, odnosno smanjila se potrebna energija za grijanjem. U svrhu dodatnog smanjenja potrebne energije za grijanje predviđa se izmjena materijala neprozirnih građevnih elemenata te ispitivanje utjecaja debljine i vrste izolacijskih materijala na svim plohama.

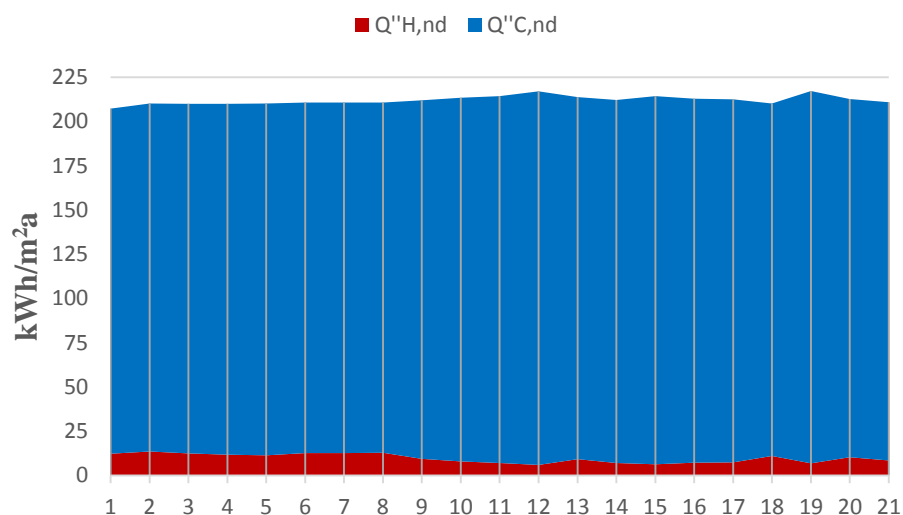
3.3. Varijanta 2

Analiza Varijante 2 identična je kao i u poglavlju 2.3 za Zagreb. Tablica 13 sadrži redoslijed iterativnih scenarija s naznačenim promjenama materijala izolacije i građevnih materijala te pripadajućim promjenama njihovih debljina, promjenama i smanjenjem ukupnih koeficijenata prolaza topline u odnosu na PAR za svaku plohu te provjeru sukladnosti s *Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*.

Promjene i razlog promjene materijala unutarnjih zidova, poda i krova identične su kao i za Zagreb (Poglavlje 2.3). Unutarnji zidovi nisu se mijenjali zbog želje da se koriste prirodni materijali. Kamen kao materijal unutarnjih zidova ne zadovoljava *Tehnički propis o racionalnoj*

uporabi energije i toplinske zaštite u zgradama. S obzirom da promjena materijala poda ne pridonosi znatnoj uštedi energije za grijanje, za Split su se koristili jednaki materijali kao za Zagreb. Krov je ostao nepromijenjenog izolacijskog materijala u odnosu na Zagreb iz razloga što građevinska praksa nalaže da najbolje rješenje za izoliranje krova jest staklena vuna. Staklena vuna ima bolja antibakterijska i antigljivična svojstva od kamene vune, dok je proces ugradnje lakši od balirane slame. Budući da se balirana slama u praksi ne pojavljuje ispod debljine od 250 mm, postavljanjem balirane slame na krov izgubila bi se korisna površina stropa. Razlike konačnog rješenja za Split u odnosu na rješenje za Zagreb odnose se na vanjski zid. Za Split je korišten kamen kao građevni materijal zbog lakše dostupnosti u priobalnom kraju te zbog većeg toplinskog kapaciteta koji je bitan za učinkovitu akumulaciju rashladne energije, odnosno pasivno hlađenje tijekom prijelaznih i ljetnih mjeseci. Povećavanjem debljine kamene vune uočen je ekstrem (Tablica 13, scenarij 12) iznad kojeg nije ekonomski opravdano ulagati u daljnju izolaciju s obzirom da JPP drastično raste (Tablica 12), dok se potrebna energija za grijanje zanemarivo smanjuje.

Analizom različitih scenarija uočeno je da balirana slama između dva sloja kamenih blokova, koji imaju ulogu građevnog materijala, može biti izvrstan izolacijski materijal koji ima gotovo identična toplinska svojstva kao i kamena vuna (Tablica 14). Za kuću od 70 m² potrebno je oko 300 bala slame. Cijena po bali slame se kreće između 10 – 20 kn te procijenjeno da JPP za baliranu slamu iznosi 45,8 godina (Tablica 12). Budući da je JPP za baliranu slamu identičan kao i za kamenu vunu, za koju se JPP kreće od 45,5 godina za 5 cm kamene vune, ključan faktor u odabiru balirane slame kao izolacijskog materijala jest manji ekološki otisak. Nakon usporedbe svih analiziranih slučajeva odabrani su za konačnu Varijantu 2 scenariji 1, 3, 7 i 14 (označeni narančastom bojom). Odabrani scenariji obuhvaćaju jelu kao građevni materijal unutarnjih zidova, 200 mm staklene vune kao izolacijski materijal i 15 mm jele kao građevni materijal krova, 100 mm kamene vune kao izolacijski materijal i 350 mm šljunka i betona kao građevni materijal poda te 300 mm kamena u dva sloja kao građevni materijal te 250 mm balirane slame kao izolacijski materijal vanjskog zida. Slika 20 prikazuje utjecaj pojedinog scenarija na promjenu godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje. Pri tome suma specifičnih potrebnih energija za grijanje i hlađenje ostaje gotovo nepromijenjena kroz svih 13 analiziranih scenarija promjene vanjske ovojnice. Konačan popis materijala s pripadajućim svojstvima i debljinama slojeva svih ploha Varijante 2 prikazuje Tablica 14.



Slika 20: Usporedba potrošnje energije za grijanje i hlađenje svih iterativnih slučajeva za Split

Tablica 12: Usporedba cijena i procijenjeni jednostavni periodi povrata za izolacijske materijale za Split

Staklena vuna					
Debljina dodane izolacije u odnosu na PAR [mm]	Cijena izolacije, [kn/m ²]	Ukupna cijena [kn]	Godišnja ušteda el. energije [kWh]	Cijena električne energije [kn/kWh]	JPP
50	18	1260	26	1	49,1
100	36	2520	42	1	51,4
150	54	3780	50	1	75,6
Kamena vuna					
50	50	3500	77	1	45,5
100	100	7000	113	1	62,1
150	150	10500	130	1	81
250	250	17500	155	1	112,9
Drvena vlakna					
100	170	11900	55	1	217,7
150	120	8400	96	1	87,2
Ovčja vuna					
100	150	10500	41	1	256,1
200	175	12250	122	1	100,4
250	200	14000	83	1	168
Balirana slama					
Količina, kom	Cijena, po kom	Ukupna cijena [kn]	Godišnja ušteda el. energije [kWh]	Cijena električne energije [kn/kWh]	JPP
300	20	6000	131	1	45,8

Tablica 13: Opis analiziranih scenarija promjene svojstava neostakljenih površina za Split

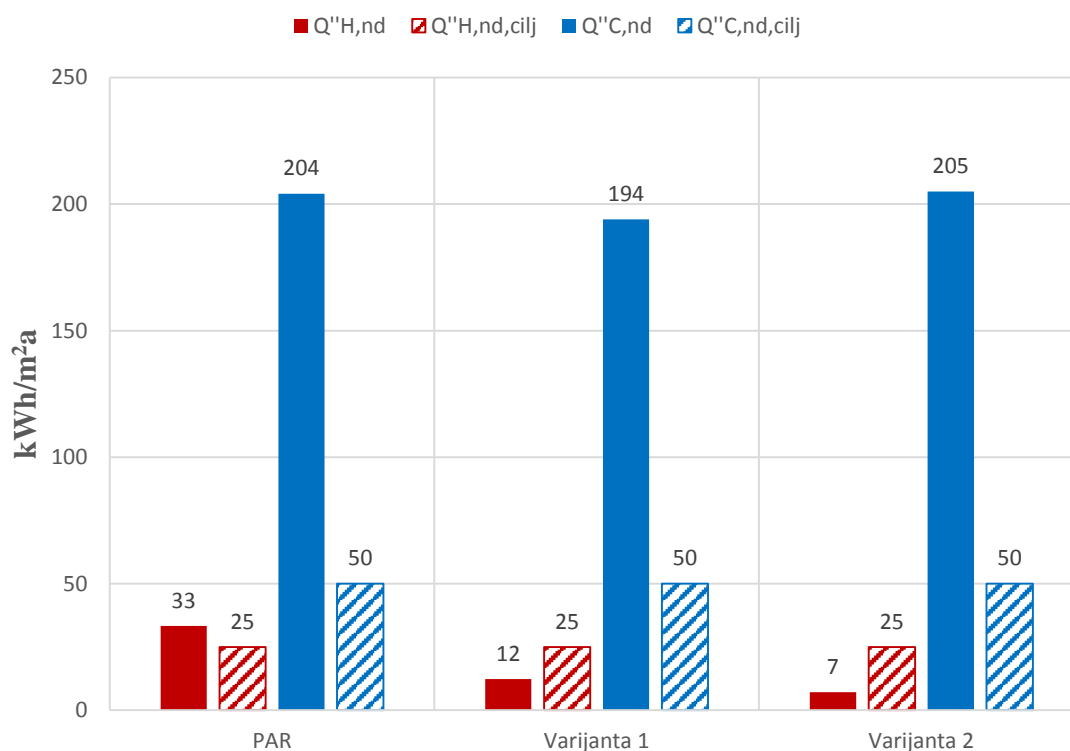
Unutarnji zid							
Scenarij	Izolacija	Debljina [mm]	Građevni Materijal	Debljina [mm]	U [W/m ² K]	Smanjenje U u odnosu na PAR	Zadovoljava Teh. propis
PAR	/	/	Hrast	200	0,855	/	ne
1	/	/	Jela	200	0,588	-31%	da
Krov							
PAR	Staklena vuna	150	Hrast	200	0,17	/	da
2	Staklena vuna	150	Jela	15	0,215	+26%	da
3	Staklena vuna	200	Jela	15	0,165	-3%	da
4	Staklena vuna	250	Jela	15	0,133	-22%	da
5	Staklena vuna	300	Jela	15	0,108	-36%	da
Pod							
PAR	/	/	Beton/šljunak	350	1,681	/	ne
6	Kamena vuna	50	Beton/šljunak	350	0,505	-70%	ne
7	Kamena vuna	100	Beton/šljunak	350	0,295	-82%	da
8	Kamena vuna	150	Beton/šljunak	350	0,211	-87%	da
Vanjski zid							
PAR	Kamena vuna	50	Glineni blok	290	0,39	/	ne
9	Kamena vuna	100	Glineni blok	290	0,259	-34%	da
10	Kamena vuna	150	Glineni blok	290	0,188	-52%	da
11	Kamena vuna	200	Glineni blok	290	0,149	-62%	da
12	Kamena vuna	300	Glineni blok	290	0,106	-73%	da
13	Ovčja vuna	250	Drvo	200	0,123	-69%	da
14	Slama	250	Kamen	300	0,168	-57%	da
15	Kamena vuna	300	Kamen	300	0,115	-71%	da
16	Kamena vuna	200	Kamen	300	0,168	-57%	da
17	Ovčja vuna	200	Kamen	400	0,178	-54%	da
18	Ovčja vuna	100	Kamen	400	0,329	-16%	da
19	/	/	Slama	350	0,121	-69%	da
20	Drvena vlakna	100	Glineni blok	200	0,293	-25%	da
21	Drvena vlakna	150	Kamen	300	0,241	-38%	da

Tablica 14: Svojstva i debljine materijala svih ploha Varijante 2 za Split

VANJSKI ZID					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Kamen	200	1,3	1	2000	0,168
Balirana slama	250	0,045	2	100	
Kamen	100	1,3	1	200	
POD					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Cementni estrih	50	1,6	1	2000	0,297
Armirani beton	100	2,6	1	2500	
Kamena vuna	100	0,036	0,9	80	
Bitumen	5	0,169	1	1100	
Beton	100	2,5	1	2400	
Šljunak (Drenaža)	200	0,7	1	1800	
STROP					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Brodski pod (Smreka/Jela)	15	0,13	2	600	0,155
Staklena vuna	200	0,035	1,03	30	
Bitumen	5	0,169	1	1100	
Valovita ploča (Bitumen)	70	0,169	1	1100	
UNUTARNJI ZID					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Smreka/Jela	200	0,13	2	600	0,588

Rezultati simulacije Varijante 2

Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 2 ukazuju na smanjenje potrebne energije za grijanje te zadržavanje gotovo iste potrebne energije za hlađenje u odnosu na PAR. Potrebna energija za grijanje smanjena je za 79% u odnosu na PAR, dok je potrebna energija za hlađenje uvećana za 0,4% (Slika 21). Smanjenje potrebne energije za grijanje rezultat je poboljšanja termodinamičkih svojstava ovojnice, odnosno zamjene ciglenih blokova kamenom i baliranom slamom te dodavanja izolacije na pod i strop. Koeficijenti prolaza topline sukladni su zahtjevima *Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* za primorsku Hrvatsku.



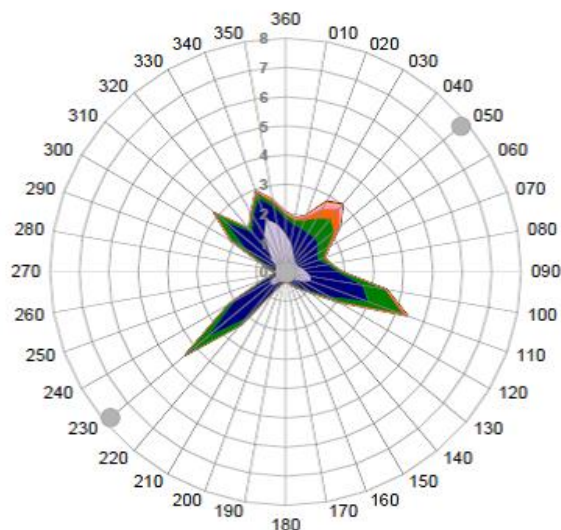
Slika 21: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1 i Varijante 2 za Split

Zaključak analize:

Promjenom materijala ovojnice te ekonomski optimalnim povećanjem izolacije postignuti su željeni rezultati u smjeru dodatnog smanjenja potrebne energije za grijanje. Postignut je optimum između početnog ulaganja, operativnih troškova te ekološkog otiska na okoliš. Za Varijantu 3 predviđena je optimizacija geometrije i orijentacije kuće te veličina ostakljenih površina u cilju smanjenja potrebne energije za hlađenje.

3.4. Varijanta 3

U Varijanti 3 promatrao se utjecaj povezanost promjene geometrije i orijentacije kuće zajedno sa promjenom veličine ostakljenja i otvora unutar kuće radi smanjenja potrebne energije za grijanje i hlađenje. Postupak analize Varijante 3 identičan je kao i za Grad Zagreb (Poglavlje 2.4), osim što je simulacija u CoolVent-u provedena za tipičnu meteorološku godinu za Split, sa smjerom strujanja i jakost vjetrova definiranim ružom vjetrova za Split (Slika 22).



Slika 22: Ruža vjetrova za Split

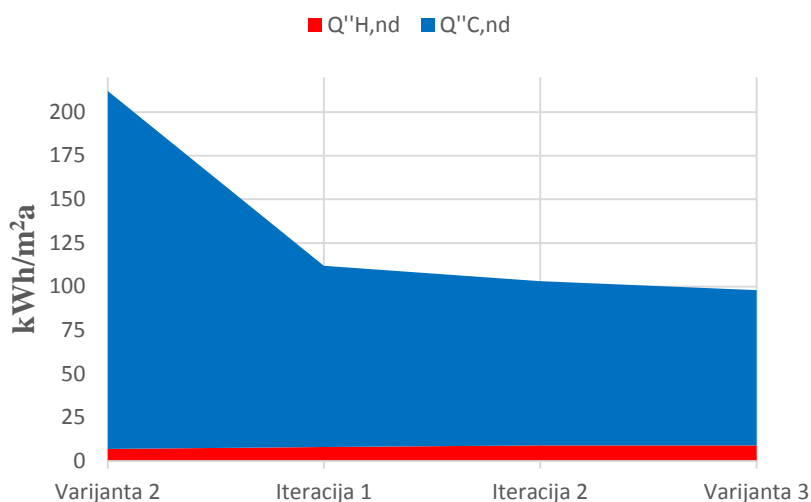
Izvor: <http://www.crocontrol.hr/default.aspx?id=235>

Rezultati simulacije Varijante 3

Tablica 15 prikazuje odnos Varijante 3 u odnosu na Varijantu 2 gdje su prikazani i iteracijski međukoraci kako bi se uočila povezanost između smanjenja površine ostakljenja i ukupne specifične energije za grijanje i hlađenje (Slika 23). Promjenom geometrije, orijentacije te smanjenjem površine ostakljenja za 62% u prvoj iteraciji smanjena je ukupna potrebna energija za grijanje i hlađenje za 47% u odnosu na Varijantu 2, gdje se grijanje povećalo za 29%, a hlađenje smanjilo za 49% (Slika 23). Daljnjim smanjenjem površine ostakljenja za 66% u drugoj iteraciji, gdje je zanemaren prozor na zapadu u zahodu te premješten prozor u spavaćoj sobi s istoka na sjever, smanjila se potrebna energija za grijanje i hlađenje za 51% u odnosu na Varijantu 2, gdje se grijanje povećalo za 27%, a hlađenje smanjilo za 54% (Slika 23). Konačno, smanjenjem ostakljenja za 70% u Varijanti 3 ostvareno zanemarivanjem prozora na zapadu u dnevnom boravku, potrebna energija za grijanje i hlađenje smanjila se za 54% u odnosu na Varijantu 2, s povećanjem grijanja za 25%, a smanjenjem hlađenja za 57% (Slika 23). Dodatno smanjenje potrebne energije za hlađenje ostvareno je dodavanjem 50 mm akumulacijske mase na podu.

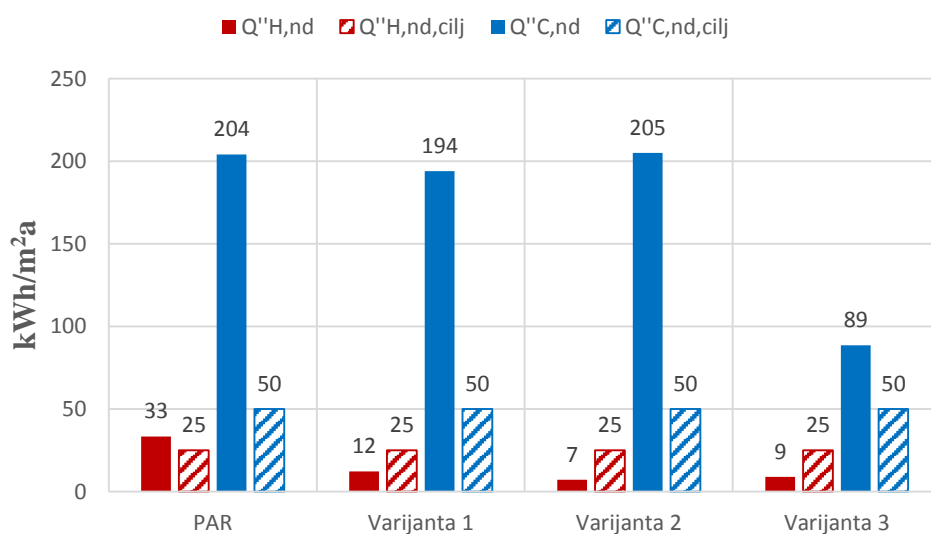
Tablica 15: Usporedba parametara između Varijante 2, iteracijskih međukoraka i Varijante 3 za Split

Iteracija	Orijentacija	$Q''_{H,nd}$ [kWh/m ² a]	$Q''_{C,nd}$ [kWh/m ² a]	$Q''_{UK,nd}$ [kWh/m ² a]	Ostakljenje [m ²]	Smanjenje ostakljenja	Smanjenje $Q''_{UK,nd}$
Varijanta 2	Istok - Zapad	7	205	212	40,89		
1	Jug - Sjever	8	104	112	15,63	-62%	-47%
2	Jug - Sjever	9	94	103	13,95	-66%	-51%
Varijanta 3	Jug - Sjever	9	89	98	12,27	-70%	-54%



Slika 23: Usporedba potrebne energije za grijanje i hlađenje između Varijante 2, iteracijskih međukoraka i Varijante 3 za Split

Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 3 ukazuju na neznatno povećanje potrebne energije za grijanje te znatno smanjenje potrebne energije za hlađenje u odnosu na Varijantu 2. U odnosu na PAR, potrebna energija za grijanje smanjena je za 73%, dok je potrebna energija za hlađenje umanjena za 57% (Slika 24).



Slika 24: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2 i Varijante 3 za Split

Zaključak analize

Varijantom 3 drastično se smanjila potrebna energija za hlađenje, pri čemu je smanjenje u ovoj varijanti ostvareno isključivo optimizacijom orijentacije kuće, prozora i veličine ostakljenja. Utjecaj pasivnog hlađenja na dodatno smanjenje potrebne energije za hlađenje prikazan je u Varijanti 5. Orijentacija kuće se prilagodila ruži vjetrova za Split za mjesece u kojima postoji potreba za hlađenjem. U Varijanti 4 ispitat će se utjecaj vanjskog zasjenjenja radi daljnjeg smanjenja potrebne energije za hlađenje.

3.5. Varijanta 4

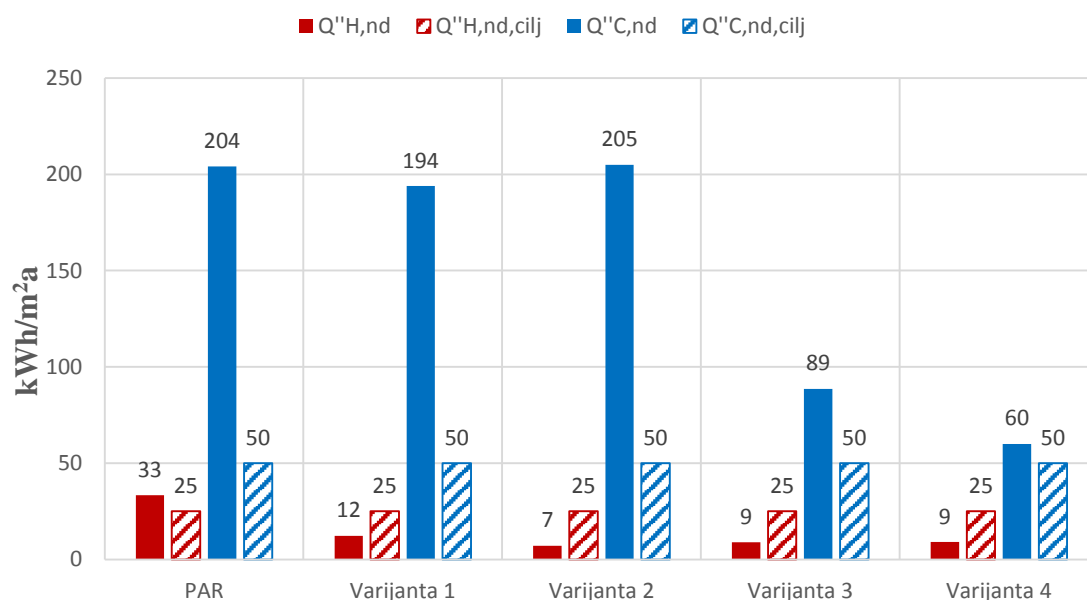
Cilj Varijante 4 jest optimizacija vanjskog zasjenjenja u ovisnosti o direktnom Sunčevom zračenju u svrhu smanjenja potrebne energije za hlađenje. Tablica 16 ispitan je utjecaj načina upravljanja vanjskim zasjenjenjem, odnosno granične vrijednosti zračenja kod kojeg se zasjenjenje otvara i zatvara. Postupak analize Varijante 4 identičan je kao i za Grad Zagreb (Poglavlje 2.5) Uvođenjem vanjskog zasjenjenja povećala se potrebna energija za grijanje, no budući da se zasjenjenje koristi samo u ljetnom periodu, povećanje energije za grijanje se zanemaruje.

Rezultati simulacije Varijante 4

Odabrana je Varijanta 4 kod koje se zasjenjenje otvara pri vrijednosti Sunčevog zračenja od $83,3 \text{ W/m}^2$ a zatvara pri $416,7 \text{ W/m}^2$. Ovakav način upravljanja dovodi do smanjenja potrebne energije za hlađenje od 33% u odnosu na Varijantu 3 te iznosi 60 kWh/m^2 . Potrebna energija za hlađenje umanjena je za 71% u odnosu na PAR (Slika 25).

Tablica 16: Usporedba parametara zasjenjenja između Varijante 3, iteracijskih međukoraka i Varijante 4 za Split

Iteracija	Otvaranje, za Q_{zr} [W/m ²]	Zatvaranje, za Q_{zr} [W/m ²]	$Q''_{C,nd}$ [kWh/m ² a]	Smanjenje $Q''_{C,nd}$
Varijanta 3	/	/	89	
1	83,3	182,2	55	-38%
2	83,3	555,6	67	-25%
Varijanta 4	83,3	416,7	60	-33%



Slika 25: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3 i Varijante 4 za Split

Zaključak analize

Dodavanjem vanjskog zasjenjenja te optimizacijom upravljanja zasjenjenja u ovisnosti o direktnom Sunčevom zračenju na plohe ostvareno je željeno smanjenje potrebne energije za hlađenje za 33% u odnosu na varijantu bez zasjenjenja. Međutim, s obzirom da je potrebna energija za hlađenje nakon svih primijenjenih strategija i dalje veća (60 kWh/m²) od ciljane vrijednosti za niskoenergetsku kuću (50 kWh/m²), cilj Varijante 5 bio je simulirati pasivno hlađenje korištenjem prirodne ventilacije.

3.6. Varijanta 5

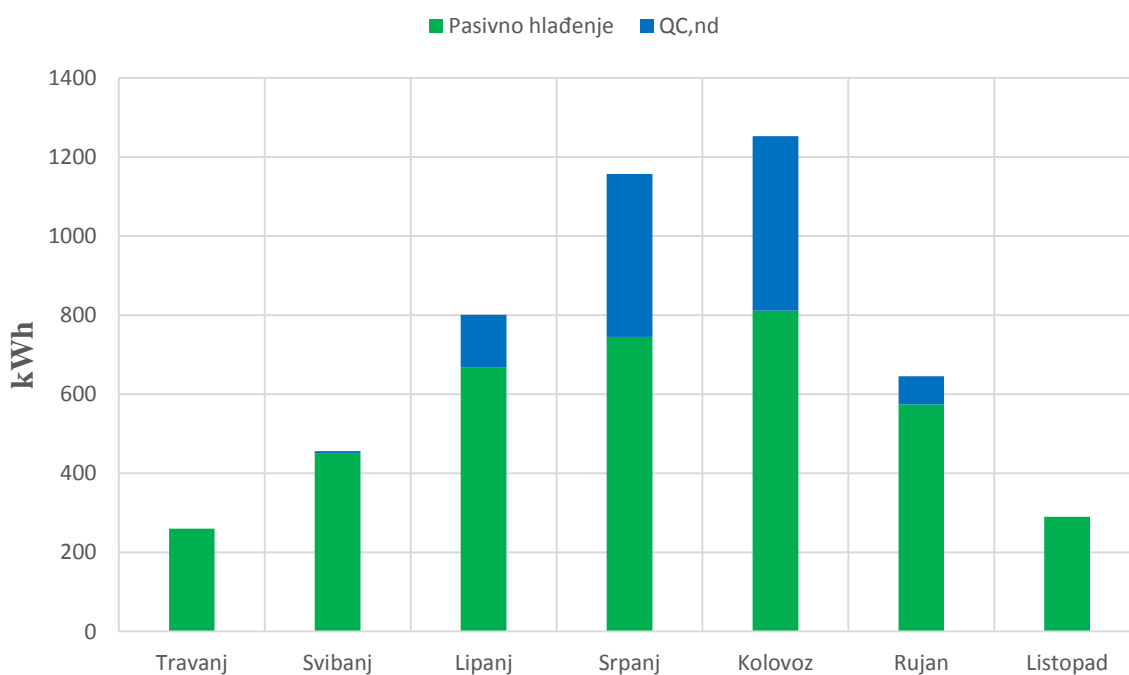
Na temelju postavne temperature u svim prostorijama kuće analiziran je utjecaj pasivnog hlađenja na potrebnu energiju za hlađenje. Pretpostavljeno je da ukoliko rezultati simulacije pokažu da je temperatura u svim prostorijama niža od postavne temperature od 26°C, nema potrebe za mehaničkim hlađenjem. Analiza je napravljena u računalnom alatu za analizu pasivnog hlađenja, CoolVent, za svaki sat tipičnog dana u mjesecu, od travnja do listopada.

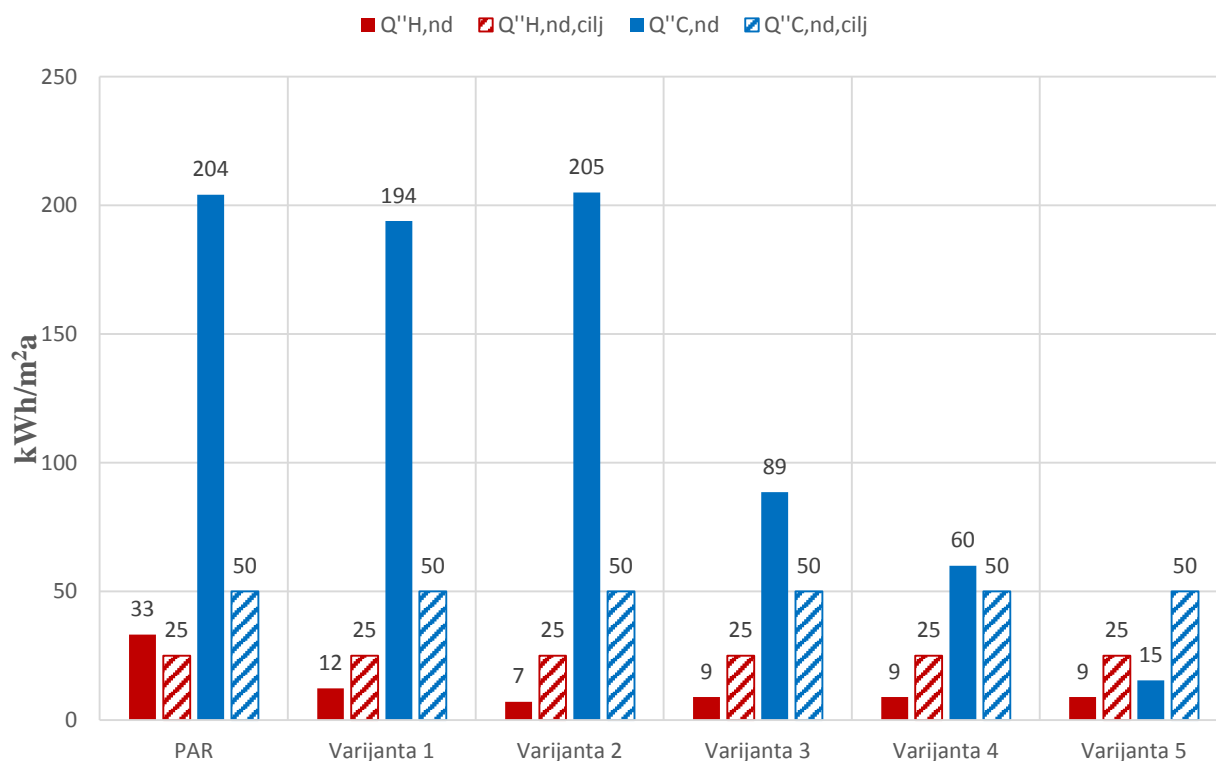
Rezultati simulacije Varijante 5

Analiza Varijante 5 u CoolVent-u pokazala je da se pasivno hlađenje uspjelo ostvariti u travnju i listopadu te da se drastično smanjila potreba za mehaničkim hlađenjem ostale mjesece. Rezultati ukazuju da je mehaničko hlađenje potrebno samo 1% vremena (9 sati) u svibnju, 20% vremena (145 sati) u lipnju, 55% vremena (407 sati) u srpnju, 54% vremena (399 sati) u kolovozu te 12% vremena (90 sati) u rujnu. Tablica 17 prikazuje razliku između potrebne energije za hlađenje bez i s pasivnim hlađenjem za prijelazne i ljetne mjesece. Slika 26 prikazuje udio potrebne energije za hlađenje koji je moguće ostvariti korištenjem pasivnog hlađenja (prirodnom ventilacijom). Rezultati ukazuju da je Varijantom 5 ostvaren učinkovit dizajn kuće s obzirom da je hlađenje u većem periodu prijelaznih mjeseca moguće ostvariti isključivo korištenjem pasivnog hlađenja. Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 5 ukazuju na smanjenje potrebne energije za hlađenje u odnosu na PAR, pri čemu je potrebna energija za hlađenje umanjena za 92% (Slika 27) te je postignut željeni cilj za niskoenergetsku obiteljsku kuću.

Tablica 17: Usporedba potrebne energije za hlađenje bez i s pasivnim hlađenjem za Split

Mjesec	Potrebna energija za hlađenje bez pasivnog hlađenja [kWh]	Potrebna energija za hlađenje uz pasivno hlađenje [kWh]	Ušteda
Travanj	260	0	100%
Svibanj	451	6	99%
Lipanj	667	134	80%
Srpanj	745	413	45%
Kolovoz	811	441	46%
Rujan	574	71	88%
Listopad	290	0	100%
UKUPNO	3799	1064	72%

**Slika 26: Udio potrebne energije za hlađenje ostvaren korištenjem pasivnog hlađenja za Split**



Slika 27: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3, Varijante 4 i Varijante 5 za Split

Zaključak analize

Prirodnom ventilacijom u svrhu pasivnog hlađenja u Varijanti 5 drastično je smanjena potrebna energija za hlađenje. Kako je navedeno za Grad Zagreb (Poglavlje 2.6), rezultate simulacije u Varijanti 5 potrebno je promatrati s dozom opreza, no ako se i zanemari pasivno hlađenje u navedenim ljetnim mjesecima potrebna energija za hlađenje iznosi 47 kWh/m². Cilj simulacije bio je pokazati kako se u prijelaznim mjesecima hlađenje ipak može ostvariti isključivo korištenjem pasivnog hlađenja, što dovodi do značajnog smanjenja potrebne energije za hlađenjem.

Optimizacija je izvršena za početno arhitektonsko rješenje (PAR) gdje potrebna energija za grijanje iznosi 33 kWh/m^2 , a za hlađenje 204 kWh/m^2 . Optimizacija je uključivala promjenu termodinamičkih svojstava prozirnih i neprozirnih građevnih materijala u Varijanti 1 i Varijanti 2, promjenu orijentacije i geometrije PAR-a te smanjenje ostakljenih površina u Varijanti 3, utjecaj zasjenjenja vanjskih ostakljenja u Varijanti 4 te integraciju strategije pasivnog hlađenja u Varijanti 5. Nakon završene optimizacije potrebna energija za grijanje iznosi 9 kWh/m^2 , a za hlađenje 15 kWh/m^2 , čime je zadovoljen *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* prema kojem ukupna godišnja potrebna energija za grijanje u kategoriji niskoenergetskih obiteljskih kuća mora biti manja od $24,84 \text{ kWh/m}^2$ za primorsku Hrvatsku, a za hlađenje manja od 50 kWh/m^2 . Konačan izgled niskoenergetske kuće za Split identičan je izgledu za Grad Zagreb (Slika 13, Slika 14, Slika 15, Slika 16 te Slika 17).

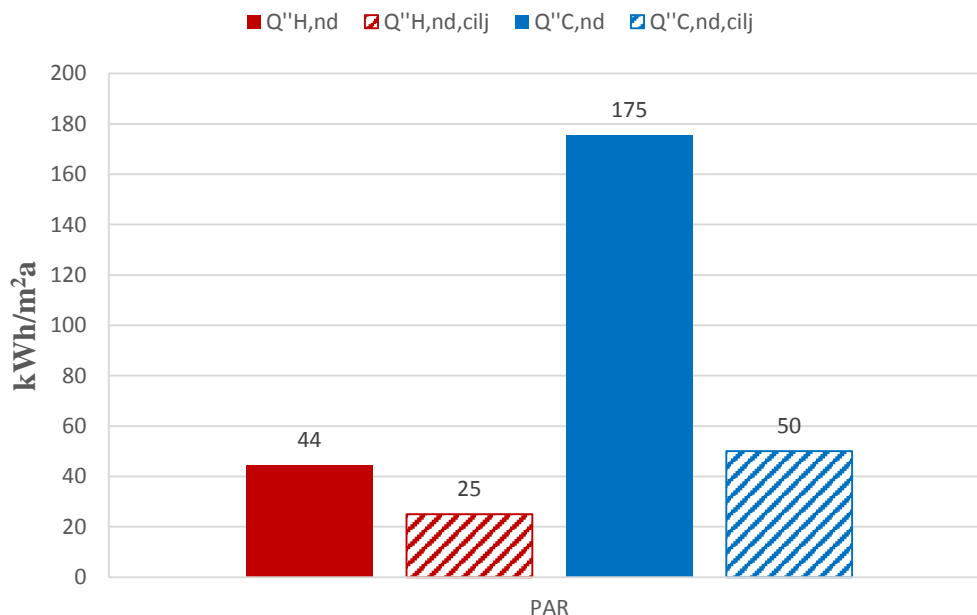
4. Optimizacija arhitektonskog rješenja kuće za Rijeku

4.1. Početno arhitektonsko rješenje (PAR)

Svi ulazni parametri te informacije o PAR-u za Rijeku identični su kao i za Zagreb (2.1) gdje je jedina razlika u podacima o vanjskim vremenskim uvjetima gdje su korišteni podaci za tipičnu meteorološku godinu za mjernu postaju Rijeka, Kozala.

Rezultati energetske simulacije početnog arhitektonskog rješenja

Iz rezultata je vidljivo da potrebna energija za grijanje premašuje zadani cilj od 24,84 kWh/m², dok je potrebna energija za hlađenje višestruko veća od zadane. Na Slika 28 prikazane su potrošnja za grijanje (crveno) i hlađenje (plavo).



Slika 28: Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje PAR-a za Rijeku

Zaključak analize:

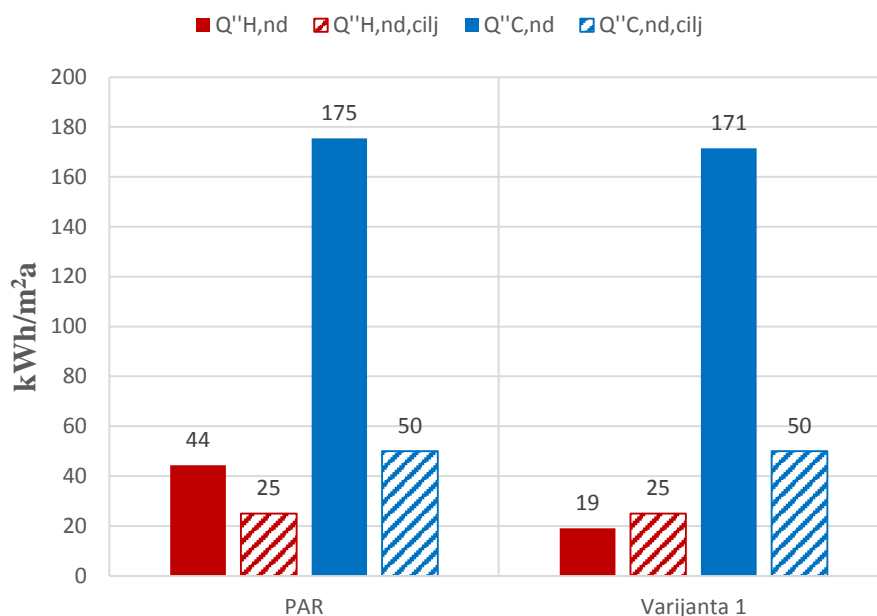
Na temelju analize rezultata početnog arhitektonskog rješenja prvi prijedlog za smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje je zamjena svih ostakljenih površina s ostakljenjem boljih termodinamičkih svojstava, odnosno nižeg koeficijenta prolaza topline. Sastav građevnih ploha, geometrija te veličina ostakljenih površina ostaje ista kao i za grad Zagreb.

4.2. Varijanta 1

Predviđene izmjene početnog arhitektonskog rješenja primijenjene su na Varijanti 1 s istim tipom ostakljenja kao i za grad Zagreb (Tablica 5).

Rezultati simulacije Varijante 1

Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 1 ukazuju na smanjenje potrebne energije za grijanje te neznatno smanjenje potrebne energije za hlađenje. Potrebna energija za grijanje smanjena je za 57% u odnosu na PAR, dok je potrebna energija za hlađenje umanjena za 2% (Slika 29).



Slika 29: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a i Varijante 1 za Rijeku

Zaključak analize:

Promjenom ostakljenja ostvario se željeni rezultat, odnosno smanjila se potrebna energija za grijanjem. U svrhu dodatnog smanjenja potrebne energije za grijanje predviđa se izmjena materijala neprozirnih građevnih elemenata te ispitivanje utjecaja debljine i vrste izolacijskih materijala na svim plohama.

4.3. Varijanta 2

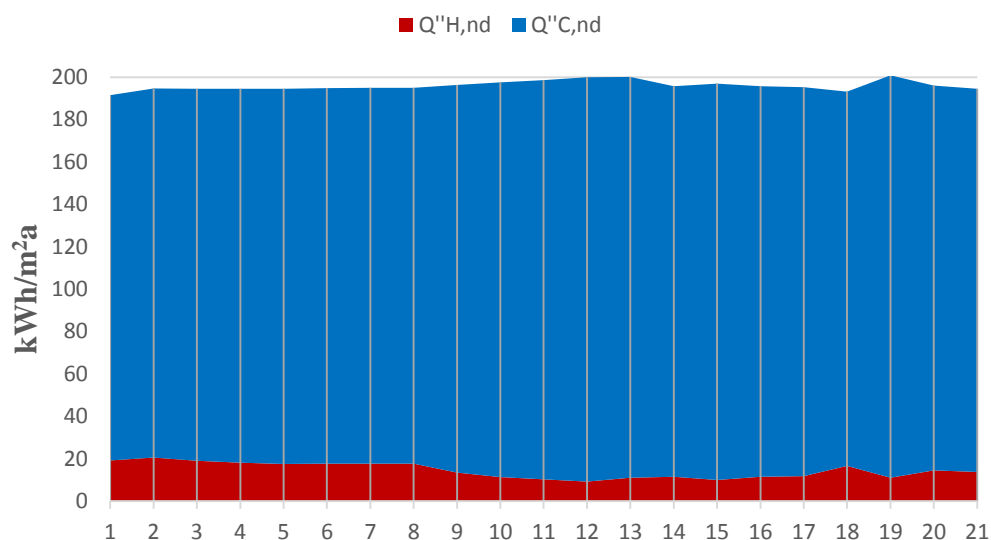
Analiza Varijante 2 identična je kao i u poglavlju 2.3 za Zagreb. Tablica 18 sadrži redoslijed iterativnih scenarija s naznačenim promjenama materijala izolacije i građevnih materijala te pripadajućim promjenama njihovih debljina, promjenama i smanjenjem ukupnih koeficijenata prolaza topline u odnosu na PAR za svaku plohu te provjeru sukladnosti s *Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*.

Promjene i razlog promjene materijala unutarnjih zidova, poda i krova identične su kao i za Zagreb (Poglavlje 2.3). Razlog zbog kojeg nisu rađene dodatne izmjene materijala poda, krova i unutarnjih zidova je identičan kao i za Split (Poglavlje 3.3). Razlike konačnog rješenja za Rijeku u odnosu na rješenje za Zagreb odnose se na vanjski zid. Za Rijeku je građevni materijal, glineni blok od cigle, ostao jednak kao i u PAR-u. Povećavanjem debljine kamene vune uočen je ekstrem (Tablica 18, scenarij 12) iznad kojeg nije ekonomski opravdano ulagati u daljnju izolaciju jer JPP drastično raste (Tablica 19) dok se potrebna energija za grijanje zanemarivo smanjuje.

Analizom različitih scenarija (Tablica 18), uočeno je da kombinacija glinenog bloka od cigle kao građevni materijal te kamene vune kao izolacijski materijal je optimalna za Varijantu 2. Za navedeni scenarij ukupna potrošnja energije je najmanja dok JPP iznosi 37,1 godinu (Tablica 19) što je daleko najmanje od svih scenarija. Nakon usporedbe svih analiziranih slučajeva odabrani su za konačnu Varijantu 2 scenariji 1, 3, 7 i 9 (označeni narančastom bojom). Odabrani scenariji obuhvaćaju jelu kao građevni materijal unutarnjih zidova, 200 mm staklene vune kao izolacijski materijal i 15 mm jele kao građevni materijal krova, 100 mm kamene vune kao izolacijski materijal i 350 mm šljunka i betona kao građevni materijal poda te 290 mm glinenih blokova od cigle kao građevni materijal te 100 mm kamene vune kao izolacijski materijal vanjskog zida. Slika 30 prikazuje utjecaj pojedinog scenarija na promjenu godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje. Pri tome suma specifičnih potrebnih energija za grijanje i hlađenje ostaje gotovo nepromijenjena kroz svih 13 analiziranih scenarija promjene vanjske ovojnice. Konačan popis materijala s pripadajućim svojstvima i debljinama slojeva svih ploha Varijante 2 prikazuje Tablica 20.

Tablica 18: Opis analiziranih scenarija promjene svojstava neostakljenih površina za Rijeku

Unutarnji zid							
Scenarij	Izolacija	Debljina [mm]	Građevni Materijal	Debljina [mm]	U [W/m ² K]	Smanjenje U u odnosu na PAR	Zadovoljava Teh. propis
PAR	/	/	Hrast	200	0,855	/	ne
1	/	/	Jela	200	0,588	-31%	da
Krov							
PAR	Staklena vuna	150	Hrast	200	0,17	/	da
2	Staklena vuna	150	Jela	15	0,215	+26%	da
3	Staklena vuna	200	Jela	15	0,165	-3%	da
4	Staklena vuna	250	Jela	15	0,133	-22%	da
5	Staklena vuna	300	Jela	15	0,108	-36%	da
Pod							
PAR	/	/	Beton/šljunak	350	1,681	/	ne
6	Kamena vuna	50	Beton/šljunak	350	0,505	-70%	ne
7	Kamena vuna	100	Beton/šljunak	350	0,295	-82%	da
8	Kamena vuna	150	Beton/šljunak	350	0,211	-87%	da
Vanjski zid							
PAR	Kamena vuna	50	Glineni blok	290	0,39	/	ne
9	Kamena vuna	100	Glineni blok	290	0,259	-34%	da
10	Kamena vuna	150	Glineni blok	290	0,188	-52%	da
11	Kamena vuna	200	Glineni blok	290	0,149	-62%	da
12	Kamena vuna	300	Glineni blok	290	0,106	-73%	da
13	Ovčja vuna	250	Drvo	200	0,123	-69%	da
14	Slama	250	Kamen	300	0,168	-57%	da
15	Kamena vuna	300	Kamen	300	0,115	-71%	da
16	Kamena vuna	200	Kamen	300	0,168	-57%	da
17	Ovčja vuna	200	Kamen	400	0,178	-54%	da
18	Ovčja vuna	100	Kamen	400	0,329	-16%	da
19	/	/	Slama	350	0,121	-69%	da
20	Drvena vlakna	100	Glineni blok	200	0,293	-25%	da
21	Drvena vlakna	150	Kamen	300	0,241	-38%	da



Slika 30: Usporedba potrošnje energije za grijanje i hlađenje svih iterativnih slučajeva za Rijeku

Tablica 19: Usporedba cijena i procijenjeni jednostavni periodi povrata za izolacijske materijale za Rijeku

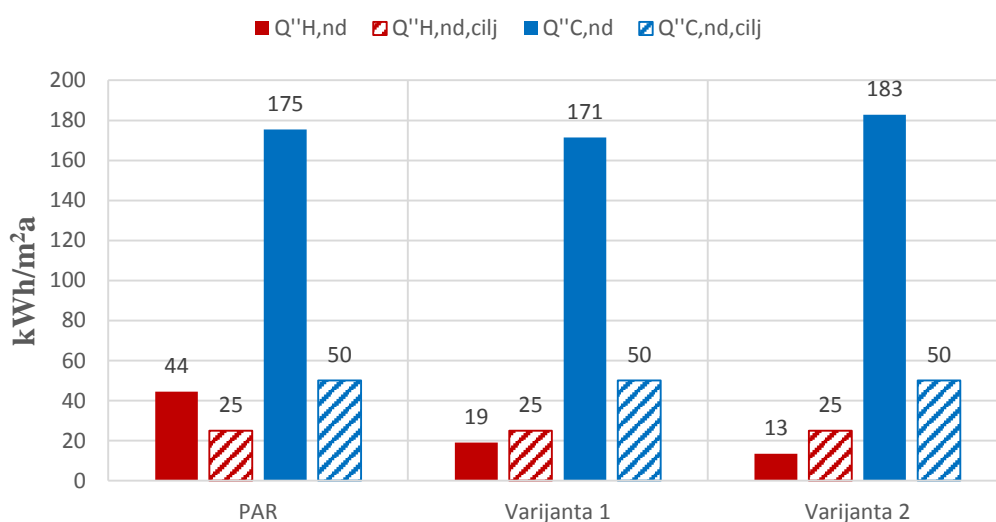
Staklena vuna					
Debljina dodane izolacije u odnosu na PAR [mm]	Cijena izolacije, [kn/m²]	Ukupna cijena [kn]	Godišnja ušteda el. energije [kWh]	Cijena električne energije [kn/kWh]	JPP
50	18	1260	34	1	37,1
100	36	2520	54	1	46,4
150	54	3780	62	1	61,3
Kamena vuna					
50	50	3500	97	1	36
100	100	7000	146	1	47,8
150	150	10500	171	1	61,3
250	250	17500	197	1	88,7
Drvena vlakna					
100	170	11900	75	1	159,4
150	120	8400	91	1	92,6
Ovčja vuna					
100	150	10500	25	1	420
200	150	12250	138	1	89
250	150	14000	156	1	89,9
Balirana slama					
Količina, kom	Cijena, po kom	Ukupna cijena [kn]	Godišnja ušteda el. energije [kWh]	Cijena električne energije [kn/kWh]	JPP
300	20	6000	143	1	41,9

Tablica 20: Svojstva i debljine materijala svih ploha Varijante 2 za Rijeku

VANJSKI ZID					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
OSB ploča	20	0,13	1,8	650	0,259
Blokovi od gline	290	0,48	1	100	
OSB ploča	20	0,13	1,8	650	
Kamena vuna	100	0,13	1	650	
Gipsana žbuka	10	0,7	1	1400	
POD					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Cementni estrih	50	1,6	1	2000	0,297
Armirani beton	100	2,6	1	2500	
Kamena vuna	100	0,036	0,9	80	
Bitumen	5	0,169	1	1100	
Beton	100	2,5	1	2400	
Šljunak (Drenaža)	200	0,7	1	1800	
STROP					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Brodski pod (Smreka/Jela)	15	0,13	2	600	0,155
Staklena vuna	200	0,035	1,03	30	
Bitumen	5	0,169	1	1100	
Valovita ploča (Bitumen)	70	0,169	1	1100	
UNUTARNJI ZID					
Materijal	Debljina [mm]	Toplinska vodljivost, λ [W/mK]	Toplinski kapacitet, c [kJ/kgK]	Gustoća, ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Smreka/Jela	200	0,13	2	600	0,588

Rezultati simulacije Varijante 2

Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 2 ukazuju na smanjenje potrebne energije za grijanje te povećanje potrebne energije za hlađenje. Potrebna energija za grijanje smanjena je za 70% u odnosu na PAR, dok je potrebna energija za hlađenje uvećana za 4% (Slika 31). Drastično smanjenje potrebne energije za grijanje rezultat je poboljšanja termodinamičkih svojstava ovojnice, odnosno dodavanja izolacije na pod i strop i vanjske zidove. Koeficijenti prolaza topline sukladni su zahtjevima *Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* za primorsku Hrvatsku.



Slika 31: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1 i Varijante 2 za Rijeku

Zaključak analize:

Promjenom materijala ovojnice te ekonomski optimalnim povećanjem izolacije postignuti su željeni rezultati u smjeru dodatnog smanjenja potrebne energije za grijanje. Postignut je optimum između početnog ulaganja, operativnih troškova te ekološkog otiska na okoliš. Za Varijantu 3 predviđena je optimizacija geometrije i orijentacije kuće te veličina ostakljenih površina u cilju smanjenja potrebne energije za hlađenje.

4.4. Varijanta 3

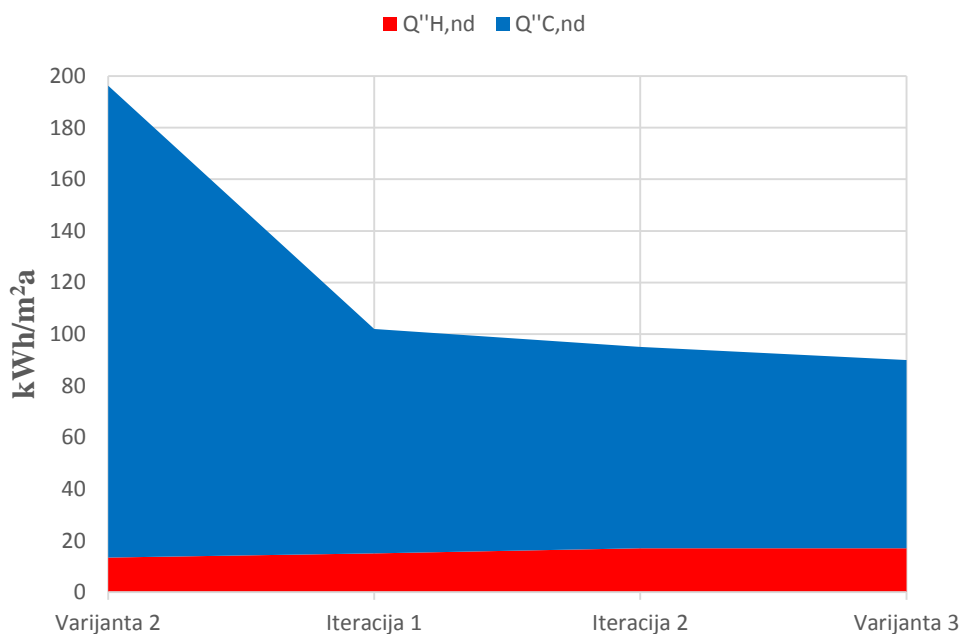
U Varijanti 3 promatrao se utjecaj povezanost promjene geometrije i orijentacije kuće zajedno sa promjenom veličine ostakljenja i otvora unutar kuće radi smanjenja potrebne energije za grijanje i hlađenje. Postupak analize Varijante 3 identičan je kao i za Grad Zagreb (Poglavlje 2.4) gdje je jedina promjena u vremenskim podacima te smjeru strujanja i jakosti vjetrova. Simulacija u CoolVent-u provedena je za tipičnu meteorološku godinu za Split zbog nedostatka podataka u potrebnom formatu za Rijeku (Poglavlje 3.4).

Rezultati simulacije Varijante 3

Tablica 21 prikazuje odnos Varijante 3 u odnosu na Varijantu 2 gdje su prikazani i iteracijski međukoraci kako bi se uočila povezanost između smanjenja površine ostakljenja i ukupne specifične energije za grijanje i hlađenje (Slika 32). Promjenom geometrije, orijentacije te smanjenjem površine ostakljenja za 62% u prvoj iteraciji smanjena je ukupna potrebna energija za grijanje i hlađenje za 48% u odnosu na Varijantu 2, gdje se grijanje povećalo za 11%, a hlađenje smanjilo za 53% (Slika 32). Daljnjim smanjenjem površine ostakljenja za 66% u drugoj iteraciji, gdje je zanemaren prozor na zapadu u zahodu te premješten prozor u spavaćoj sobi s istoka na sjever, smanjila se potrebna energija za grijanje i hlađenje za 52% u odnosu na Varijantu 2, gdje se grijanje povećalo za 25%, a hlađenje smanjilo za 57% (Slika 32). Konačno, smanjenjem ostakljenja za 70% u Varijanti 3 ostvareno zanemarivanjem prozora na zapadu u dnevnom boravku, potrebna energija za grijanje i hlađenje smanjila se za 55% u odnosu na Varijantu 2, s povećanjem grijanja za 23%, a smanjenjem hlađenja za 60% (Slika 32). Dodatno smanjenje potrebne energije za hlađenje ostvareno je dodavanjem 50 mm akumulacijske mase na podu.

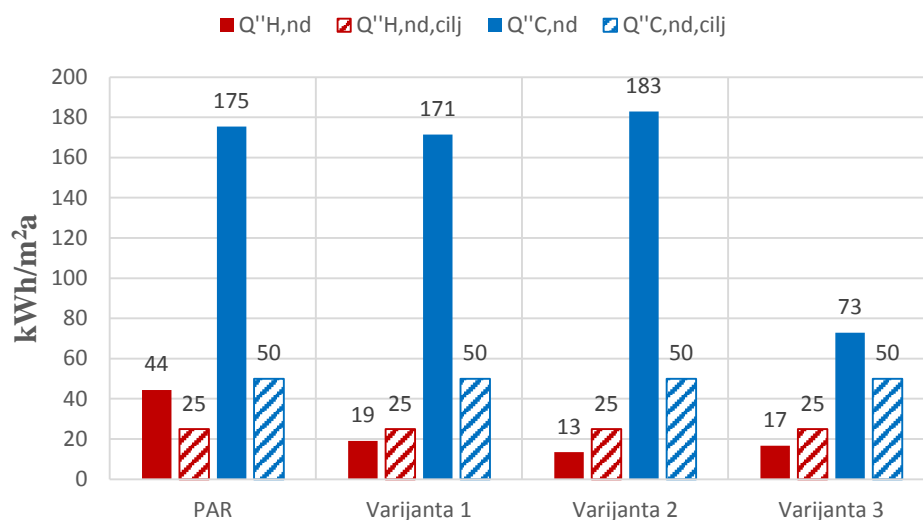
Tablica 21: Usporedba parametara između Varijante 2, iteracijskih međukoraka i Varijante 3 za Rijeku

Iteracija	Orijentacija	$Q''_{H,nd}$ [kWh/m ² a]	$Q''_{C,nd}$ [kWh/m ² a]	$Q''_{UK,nd}$ [kWh/m ² a]	Ostakljenje [m ²]	Smanjenje ostakljenja	Smanjenje $Q''_{UK,nd}$
Varijanta 2	Istok - Zapad	13	183	196	40,89		
1	Jug - Sjever	15	87	102	15,63	-62%	-48%
2	Jug - Sjever	17	78	95	13,95	-66%	-52%
Varijanta 3	Jug - Sjever	17	73	89	12,27	-70%	-55%



Slika 32: Usporedba potrebne energije za grijanje i hlađenje između Varijante 2, iteracijskih međukoraka i Varijante 3 za Rijeku

Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 3 ukazuju na neznatno povećanje potrebne energije za grijanje te znatno smanjenje potrebne energije za hlađenje u odnosu na Varijantu 2. U odnosu na PAR, potrebna energija za grijanje smanjena je za 63%, dok je potrebna energija za hlađenje umanjena za 58% (Slika 33).



Slika 33: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2 i Varijante 3 za Rijeku

Zaključak analize

Varijantom 3 drastično se smanjila potrebna energija za hlađenje, pri čemu je smanjenje u ovoj varijanti ostvareno isključivo optimizacijom orijentacije kuće, prozora i veličine ostakljenja, dok je utjecaj pasivnog hlađenja na dodatno smanjenje potrebne energije za hlađenje prikazan u Varijanti 5. U Varijanti 4 ispitat će se utjecaj vanjskog zasjenjenja radi daljnjeg smanjenja potrebne energije za hlađenje.

4.5. Varijanta 4

Cilj Varijante 4 jest optimizacija vanjskog zasjenjenja u ovisnosti o direktnom Sunčevom zračenju u svrhu smanjenja potrebne energije za hlađenje. Tablica 22 ispitan je utjecaj načina upravljanja vanjskim zasjenjenjem, odnosno granične vrijednosti zračenja kod kojeg se zasjenjenje otvara i zatvara. Postupak analize Varijante 4 identičan je kao i za Grad Zagreb (Poglavlje 2.5) Uvođenjem vanjskog zasjenjenja simulacijom povećala se potrebna energija za hlađenje, no budući da zasjenjenje se koristi samo u ljetnom periodu, povećanje energije za grijanje se zanemaruje.

Tablica 22: Usporedba parametara zasjenjenja između Varijante 3, iteracijskih međukoraka i Varijante 4 za Rijeku

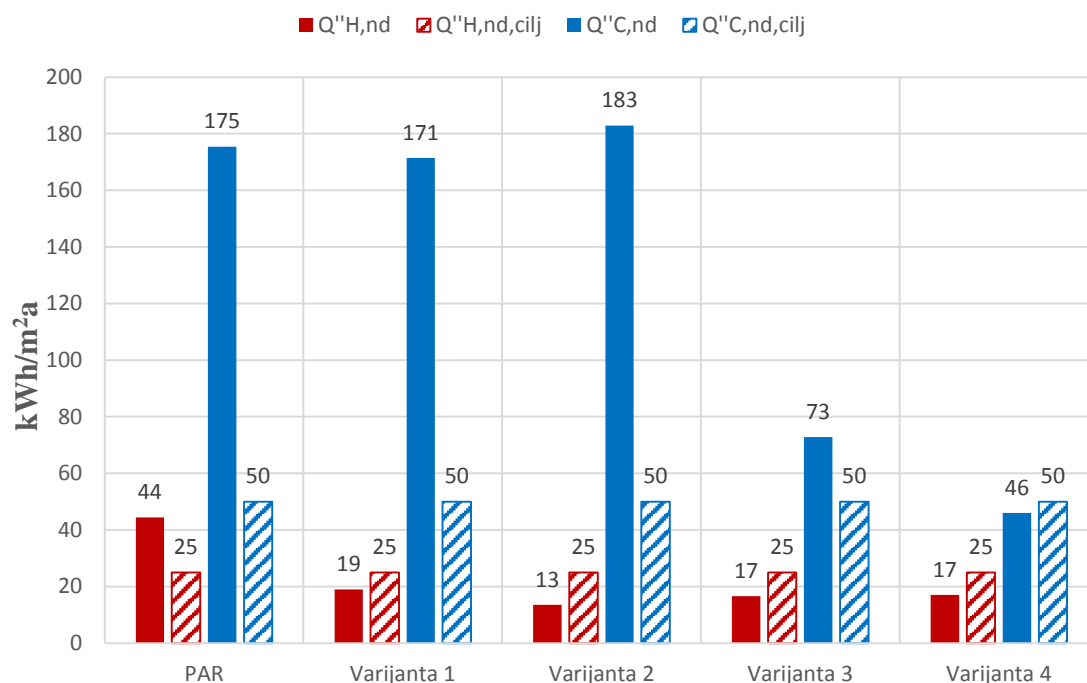
Iteracija	Otvaranje, za Q_{zr} [W/m ²]	Zatvaranje, za Q_{zr} [W/m ²]	$Q''_{C,nd}$ [kWh/m ² a]	Smanjenje $Q''_{C,nd}$
Varijanta 3	/	/	73	
1	83,3	182,2	43	-41%
2	83,3	277,8	55	-25%
Varijanta 4	83,3	555,6	46	-37%

Rezultati simulacije Varijante 4

Odabrana je Varijanta 4 kod koje se zasjenjenje otvara pri vrijednosti Sunčevog zračenja od 83,3 W/m² a zatvara pri 416,7 W/m². Ovakav način upravljanja dovodi do smanjenja potrebne energije za hlađenje od 37% u odnosu na Varijantu 3 te iznosi 46 kWh/m². Potrebna energija za hlađenje umanjena je za 74% u odnosu na PAR (Slika 34).

Zaključak analize

Dodavanjem vanjskog zasjenjenja te optimizacijom upravljanja zasjenjenja u ovisnosti o direktnom Sunčevom zračenju na plohe ostvareno je željeno smanjenje potrebne energije za hlađenje za 37% u odnosu na varijantu bez zasjenjenja. Međutim, s obzirom da je potrebna energija za hlađenje nakon svih primijenjenih strategija i dalje veća (60 kWh/m²) od ciljane vrijednosti za niskoenergetsku kuću (50 kWh/m²), cilj Varijante 5 bio je simulirati pasivno hlađenje korištenjem prirodne ventilacije.



Slika 34: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3 i Varijante 4 za Rijeku

4.6. Varijanta 5

Na temelju postavne temperature u svim prostorijama kuće analiziran je utjecaj pasivnog hlađenja na potrebnu energiju za hlađenje. Pretpostavljeno je da ukoliko rezultati simulacije pokažu da je temperatura u svim prostorijama niža od postavne temperature od 26°C, nema potrebe za mehaničkim hlađenjem. Analiza je napravljena u računalnom alatu za analizu pasivnog hlađenja, CoolVent, za svaki sat tipičnog dana u mjesecu, od travnja do listopada.

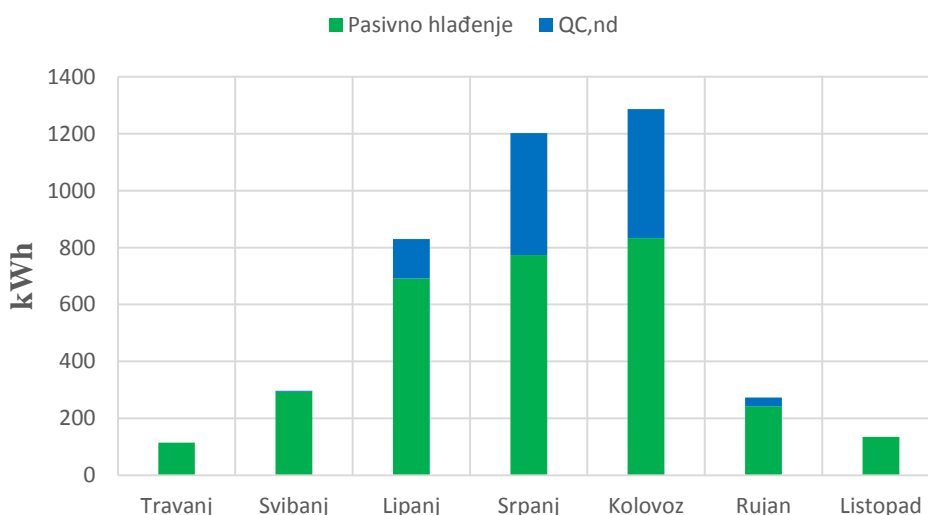
Rezultati simulacije Varijante 5

Analiza Varijante 5 u CoolVent-u pokazala je da se pasivno hlađenje uspješno ostvariti u travnju i listopadu te da se drastično smanjila potreba za mehaničkim hlađenjem za ostale mjesece. Udjeli vremena u kojem je ostvareno pasivno hlađenje su identični kao i za Split

(Rezultati simulacije Varijante 5) s obzirom da su u CoolVentu korišteni vremenski podaci za Split. Razlog tome je nedostatak vremenskih podataka za Rijeku. Tablica 23 prikazuje razliku između potrebne energije za hlađenje bez i s pasivnim hlađenjem za prijelazne i ljetne mjesece. Slika 35 prikazuje udio potrebne energije za hlađenje koji je moguće ostvariti korištenjem pasivnog hlađenja (prirodnom ventilacijom). Rezultati ukazuju da je Varijantom 5 ostvaren učinkovit dizajn kuće s obzirom da je hlađenje u većem periodu prijelaznih mjeseca moguće ostvariti isključivo korištenjem pasivnog hlađenja.

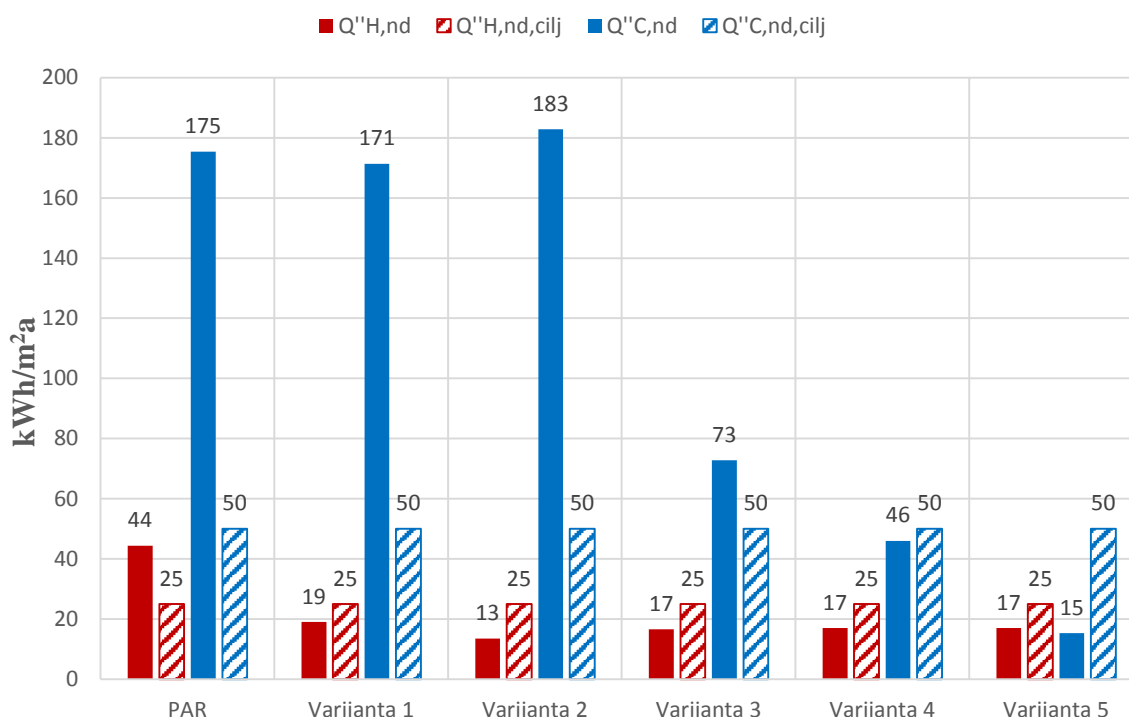
Tablica 23: Usporedba potrebne energije za hlađenje bez i s pasivnim hlađenjem za Rijeku

Mjesec	Potrebna energija za hlađenje bez pasivnog hlađenja [kWh]	Potrebna energija za hlađenje uz pasivno hlađenje [kWh]	Ušteda
Travanj	114	0	100%
Svibanj	293	4	99%
Lipanj	691	139	80%
Srpanj	744	429	45%
Kolovoz	834	453	46%
Rujan	243	30	88%
Listopad	135	0	100%
UKUPNO	3083	1054	66%



Slika 35: Udio potrebne energije za hlađenje ostvaren korištenjem pasivnog hlađenja za Rijeku

Rezultati dobiveni energetsom simulacijom Varijante 5 ukazuju na smanjenje potrebne energije za hlađenje u odnosu na PAR, pri čemu je potrebna energija za hlađenje umanjena za 91% (Slika 36) te je postignut željeni cilj za niskoenergetsku obiteljsku kuću.



Slika 36: Usporedba potrebnih energija za grijanje i hlađenje između PAR-a, Varijante 1, Varijante 2, Varijante 3, Varijante 4 i Varijante 5 za Rijeku

Zaključak analize

Prirodnom ventilacijom u svrhu pasivnog hlađenja u Varijanti 5 drastično je smanjena potrebna energija za hlađenje. Kako je navedeno za Grad Zagreb (Poglavlje 2.6), rezultate simulacije u Varijanti 5 potrebno je promatrati s dozom opreza, no ako se zanemari pasivno hlađenje u navedenim ljetnim mjesecima potrebna energija za hlađenje iznosi 41 kWh/m² što je i dalje manje od ciljne vrijednosti. Cilj simulacije bio je pokazati kako se u prijelaznim mjesecima hlađenje ipak može ostvariti isključivo korištenjem pasivnog hlađenja, što dovodi do značajnog smanjenja potrebne energije za hlađenjem.

Optimizacija je izvršena za početno arhitektonsko rješenje (PAR) gdje potrebna energija za grijanje iznosi 44 kWh/m^2 , a za hlađenje 175 kWh/m^2 . Optimizacija je uključivala promjenu termodinamičkih svojstava prozirnih i neprozirnih građevnih materijala u Varijanti 1 i Varijanti 2, promjenu orijentacije i geometrije PAR-a te smanjenje ostakljenih površina u Varijanti 3, utjecaj zasjenjenja vanjskih ostakljenja u Varijanti 4 te integraciju strategije pasivnog hlađenja u Varijanti 5. Nakon završene optimizacije potrebna energija za grijanje iznosi 17 kWh/m^2 , a za hlađenje 15 kWh/m^2 , čime je zadovoljen *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* prema kojem ukupna godišnja potrebna energija za grijanje u kategoriji niskoenergetskih obiteljskih kuća mora biti manja od $24,84 \text{ kWh/m}^2$ za primorsku Hrvatsku, a za hlađenje manja od 50 kWh/m^2 . Konačan izgled niskoenergetske kuće za Rijeku identičan je izgledu za Grad Zagreb (Slika 13, Slika 14, Slika 15, Slika 16 te Slika 17).

5. Zaključak

U radu je prikazan je proces optimizacije početnog arhitektonskog rješenja (PAR) obiteljske kuće primjenom programskog alata TRNSYS za energetska modeliranje te programa CoolVent za simulaciju pasivnog hlađenja. Cilj rada bio je optimizacijom početnog arhitektonskog rješenja ostvariti niskoenergetski standard obiteljske kuće prema *Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* za Grad Zagreb, Split i Rijeku. Svrha rada bila je naučiti koristiti programske alate za energetska modeliranje, upoznati se s matematičkim modelima koji se koriste za simulaciju tranzijentnog ponašanja sustava, uočiti njihovu problematiku i kompleksnost te korištenjem alata provesti višeparametarsku optimizaciju sustava.

Za sva tri grada proveden je identičan postupak optimizacije za smanjenje potrošnje potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje kako bi se zadovoljio standard niskoenergetske kuće. U prvoj varijanti optimizacije promijenjena je vrsta ostakljenja u svrhu smanjenja potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje. U drugoj varijanti promijenjen je sastav vanjske ovojnice te debljina pojedinih materijala u svrhu daljnjeg smanjenja potrebne godišnje energije za grijanje uz zadovoljenje najvećih dopuštenih vrijednosti koeficijenta prolaza topline navedenih u *Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*. U trećoj varijanti izvršena je daljnja optimizacija geometrije kuće, veličine vanjskog ostakljenja te orijentacije kuće. U četvrtoj varijanti analizirana je primjena zasjenjenja vanjskih ostakljenja u cilju dodatnog smanjenja potrebne godišnje energije za hlađenje. Konačno, cilj pete varijante bio je potpuno ukloniti potrebu za mehaničkim hlađenjem u prijelaznim mjesecima (travanj, svibanj, rujan, listopad) korištenjem pasivnog hlađenja, te time smanjiti potrebnu godišnju energiju za hlađenje.

Konačno rješenje sadrži podatke o sastavu ovojnice, svojstvima i veličini ostakljenja, sustav zasjenjenja te geometriju i orijentaciju u cilju postizanja pasivnog hlađenja. Glavna razlika za različita klimatska podneblja (Zagreb, Split i Rijeku) su rezultati o potrebnim energijama za grijanje i hlađenje te sastav ovojnice, dok su ostali parametri jednaki.

Prema *Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* ukupna godišnja potrebna energija za grijanje u kategoriji niskoenergetskih obiteljskih kuća mora biti manja od 40,50 kWh/m² za kontinentalnu Hrvatsku, 24,84 kWh/m² za primorsku Hrvatsku, a za hlađenje manja od 50 kWh/m². Dobiveni rezultati optimizacije ukazuju da ukupna godišnja potrebna energija za Grad Zagreb iznosi 28 kWh/m² za grijanje, odnosno 5 kWh/m² za hlađenje, što rezultira ukupnom godišnjom potrebnom energijom od 32 kWh/m². Pri tome je godišnja potrebna energija za grijanje smanjena za 72%, a potrebna energija za hlađenje za 97% u odnosu na PAR. Za Split je postignuto rješenje za koje godišnja potrebna energija iznosi 9 kWh/m² za grijanje i 15 kWh/m² za hlađenje, što rezultira ukupnom godišnjom potrebnom energijom od 24 kWh/m². Pri tome je godišnja potrebna energija za grijanje smanjena za 73%, a potrebna energija za hlađenje za 92% u odnosu na PAR. Rezultati optimizacije za Rijeku iznose 17 kWh/m² za grijanje i 15 kWh/m² za hlađenje, što rezultira ukupnom godišnjom potrebnom energijom od 32 kWh/m². Pri tome je godišnja potrebna energija za grijanje smanjena za 62%, a potrebna energija za hlađenje za 91% u odnosu na PAR.

Rezultati simulacije ukazuju da je upotrebom računalnih alata za energetske modeliranje zgrada moguće ostvariti višeparametarsku optimizaciju za postizanje standarda niskoenergetske gradnje za određenu namjenu zgrade i klimatološke uvjete na lokaciji zgrade. Pri tome se parametri optimizacije mogu odnositi na sastav, geometriju i orijentaciju prozirnih i neprozirnih građevnih elemenata, upotrebu i način upravljanja vanjskim zasjenjenjem, metode pasivnog grijanja i hlađenja, investicijske troškove i slično. Daljnji korak je implementacija dobivenog rješenja u praksi, odnosno pokušaj izgradnje prototipa niskoenergetske obiteljske kuće u sklopu budućeg poslovnog plana u Istri.

POPIS LITERATURE

- [1] Andrić K. 2018. **Projekt PE**, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [2] Kušen V. 2017. **Interdisciplinarni pristup korištenju energetske modela u fazi ranog dizajna niskoenergetskih zgrada**. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [3] <https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/dodatni/438515.pdf>
- [4] <http://meteo.hr/index.php>
- [5] "Toplinska svojstva građevinskih materijala" – Predavanje predmeta "Građevinska fizika, Građevinski fakultet, Zagreb
- [6] <http://www.buildmagazin.com/eindex2.aspx?fld=tekstovi&ime=bm0736.htm>
- [7] <https://hammerandhand.com/portfolio/karuna-house/wall-assembly/>
- [8] <http://www.yourhome.gov.au/passive-design/orientation>
- [9] https://www.fsb.unizg.hr/termolab/nastava/Solar_OIE_skripta_final_recenz_web.pdf
- [10] <http://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/01-GettingStarted.pdf>
- [11] <http://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/06-MultizoneBuilding.pdf>
- [12] <http://www.enu.fzoeu.hr/assets/files/post/146/list/1tm.pdf>
- [13] http://www.mgipu.hr/doc/energetskaucinkovitost/hrn_en_13790_primjeri%20proracuna_javn_a.pdf
- [14] ASHRAE, 2001 *ASHRAE Handbook-Fundamentals*, Atlanta, Ga. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2001.
- [15] <http://www.greenspec.co.uk/building-design/thermal-mass/>

[16]

<https://www.engineering.com/Library/ArticlesPage/tabid/85/ArticleID/152/categoryId/11/Thermal-Conductivity.aspx>

[17] <http://www.osb-info.org/technical.html>

[18] <http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/>

[19] https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska_vodljivost

[20]

https://www.researchgate.net/publication/236999838_Bulk_Density_of_Wet_and_Dry_Wheat_Straw_and_Switchgrass_Particles

[21] <http://www.perforum.info/attachments/deo.pdf>

[22] https://bib.irb.hr/datoteka/475059.Diplomski_rad_Jurisko.pdf

[23] <http://www.greenspec.co.uk/building-design/woodfibre-insulation-intro/>

[24] <http://www.zelena-gradnja.hr/>